

НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И КОНСТРУИРОВАНИЯ ПИТАТЕЛЕЙ ДЛЯ СЕПАРИРОВАНИЯ ЗЕРНА В ВЕРТИКАЛЬНОМ ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

В статье приведен литературный анализ существующих питателей для подачи зернового материала в воздушный сепаратор, выявлены основные их недостатки, поставлены задачи и пути их решения. Разработана рабочая теория вопроса равномерного распределения элементов зерновой смеси.

Зерновая смесь, полученная после уборки урожая, состоит из различных семян культурных и сорных растений, а также содержит примеси минерального и органического происхождения. Выделение семян основной культуры в чистом виде является одной из важнейших и трудоемких технологических операций в процессах приема, хранения и переработки зерна.

При подготовке посевного материала степень очистки зерна во многом влияет на урожайность, а также на стабильность качества зерна при хранении.

Для семенного зерна очистка его в сочетании с последующим сортированием зерна по добротности является основной операцией, обеспечивающей получение высококачественных семян для посева.

Четкость сепарирования на промежуточных стадиях измельчения и шелушения не только влияет на качество продукции и степень использования сырья, но и определяет нагрузку и эффективность работы остальных технологических машин, а следовательно, производительность и технико-экономические показатели предприятий в целом. Достаточно отметить, что недостаточная зерноочистка мелких фракций в крупках, поступающих на ситовечные машины, не позволяет установить оптимальный воздушный режим; недосев муки в крупках и дунстах, поступающих на размол, приводит к перегрузке вальцового станка и снижает качество муки; неполное извлечение ядра из продуктов шелушения крупяных культур вызывает увеличение количества дробленого и перегрузку шелушительных машин.

Удаление из зерна семян сорных растений, обрывков их стеблей, обмолоченных колосков и других примесей органического и неорганического происхождения значительно повышает товарную ценность зерна, улучшает его семенные качества и стойкость при хранении.

Многочисленные исследования, посвященные изучению факторов, влияющих на стойкость зерна при его хранении, показывают, что влажность семян сорняков и других органических примесей,

как правило, в два и более раза превосходит влажность зерен основной культуры свежубранного зерна. Жизнедеятельность этих примесей также значительно выше, так, интенсивность дыхания семян сорных растений в 2,7-2,9 раза больше, чем зерен пшеницы, при одинаковой их влажности.

Наличие сорняков, щуплых и битых зерен и других органических примесей в свежубранной зерновой массе обуславливает интенсивное дыхание, сопровождаемое теплообразованием, которое в сочетании с плохой теплопроводностью зерна приводит к его самосогреванию и порче. Присутствие примесей в зерне, особенно сыром и влажном, ухудшает сыпучесть зерна и осложняет его сушку в наиболее распространенных сушилках шахтного типа. Наличие в зерне солоmistых примесей нередко является причиной загорания зерна в сушилках /1/.

В процессах переработки зерна в муку и крупу очистка зерна от примесей также занимает весьма важное место, так как из недостаточно тщательно очищенного зерна нельзя получить муку или крупу надлежащего качества.

Таким образом, удаление из зерновой массы примесей является одной из важнейших задач в процессах послеуборочной обработки зерна и дальнейшей его переработки в пищевые продукты.

Сепарирование зерна и продуктов его переработки возможно лишь в тех случаях, когда частицы компонентов исходной смеси имеют достаточно различные аэродинамические и физико-механические свойства: парусность, площадь миделева сечения, размеры, форму, плотность, упругость, коэффициенты трения, магнитную восприимчивость и т. п.

Для очистки или сортирования частиц по их аэродинамическим свойствам применяется продувка зерна потоком воздуха. Применяя только этот способ очистки зерна, можно удалить 50% и более всех примесей, содержащихся в зерне /2/.

Способов очистки в воздушном канале достаточно большое количество, но они не всегда отвечают основным требованиям к качеству очистки и производительности.

Наибольшее распространение благодаря конструктивной простоте и компактности устройства получил способ сепарирования зерновой смеси в вертикальном воздушном потоке. Его применяют в современных зерновых сепараторах, пневмосепараторах и аспираторах отечественного и зарубежного производства.

Современные зерноперерабатывающие предприятия в основном оснащены машинами различных модификаций с сепарированием в вертикальном воздушном потоке. К машинам такого типа относят воздушно-ситовые ворохоочистители ЗВ-50, ЗД-10, сепараторы ЗСМ, ЗВС, пневматические сепараторы БПС, аспираторы и аспирационные колонки ЗПА, БАС, БКА, БДА, БВЗ и другие. Большинство передовых фирм ФРГ («Миаг»), Швейцарии («Бюлер»), США («Хэпт Картер»), Англии («Генри Саймон»), Италии («Окрим», «Гольфетто») и других стран выпускают машины такого же типа.

Воздушный сепаратор, являющийся машиной для обработки зерновых смесей воздушным потоком, обычно состоит из питающего устройства, пневмосепарирующего канала, устройства для очистки воздуха после сепарации и вентилятора /3/.

В технической литературе приведено много данных, касающихся описания принципа работы и конструкции воздушных сепараторов, а также данных об аэродинамических свойствах компонентов зерновых смесей. Но сведений, необходимых для обоснования основных параметров, расчета и конструирования воздушных сепараторов и критериев оценки эффективности их работы, недостаточное количество, и они не отличаются единством направления в научных разработках.

В настоящее время исследователями процесса пневмосепарирования сделаны попытки учесть на основе теории вероятности факторы многослойности потока и взаимодействия зерновок и примесей в зоне сепарирования, однако эти вопросы разработаны не настолько полно, чтобы их можно было использовать для строгого описания процесса воздушного сепарирования в виде математических моделей.

В последних исследованиях процесса пневмосепарирования зерна в вертикальном воздушном потоке (П.Н. Платонов, А.И. Папченко, Б.И. Зюзьков, З.Х. Ицекзон, А.С. Матвеев, С.С. Шкляр и другие) рассмотрено влияние основных факторов на эффективность процесса, разработаны предложения по повышению его эффективности. В то же время физическая картина процесса и движения частиц сепарируемого материала не получила более полного отражения и нуждается в дальнейшем

развитии /3/. По данным этих исследований, частицы, поданные в канал, имеют первоначальную скорость, равную нулю, а их траектории представляют собой прямые линии, направленные вверх или вниз из точек первоначального положения частиц.

Однако, по данным других исследователей (А.Я. Малис, В.В. Гортинский, А.Б. Демский и другие), частицы поступают в канал из питающего устройства с некоторой скоростью, характеризующейся величиной и направлением. Но и эти исследователи предполагали подачу зернового сырья по наклонной плоскости, в то же время подаче зерна рифлеными питающими валками уделено мало внимания.

В общем случае математическая модель пневмосепарирования представляется функцией с достаточно большим числом переменных факторов:

$$E = f(q, v_B, B, \omega, C_0, \Phi_B, H_1, H_2, \alpha, K_H, K_{II}, K_3, K_K, K_{np}), \quad (1)$$

где q – удельная нагрузка на канал;
 v_B – средняя скорость воздушного потока;
 B – ширина пневмосепарирующего канала;
 ω – относительная влажность сепарируемой смеси;
 C_0 – начальная скорость сепарируемой смеси;
 Φ_B – коэффициент вариации поля скоростей воздушного потока;
 H_1, H_2 – высота соответственно верхней и нижней части канала;
 α – угол ввода сепарируемой смеси;
 K_H – коэффициент неравномерности распределения потока по ширине канала;
 K_{II} – коэффициент неравномерности распределения сепарируемой смеси по ширине канала;
 K_3 – коэффициент пропорциональности силы аэродинамического сопротивления зерновок;
 K_K – коэффициент конструктивного решения и формы канала;
 K_{np} – коэффициент пропорциональности силы аэродинамического сопротивления частиц примесей.

А.Я. Малисом /2/ в модель процесса введено три фактора q, v_B, B , необходимых для определения размеров пневмосепарирующего канала при разработке машин с учетом натуральной размерности факторов, а количественное значение остальных факторов изменяет величину эффективности не более чем на 1%.

$$E = 0,5018 - 0,0031q + 0,0613v_B + 0,0008B. \quad (2)$$

Однако из этого уравнения регрессии видно, что и ширина канала существенного влияния не оказывает.

Имеющееся оборудование для сепарирования зерна и продуктов его переработки по своим эксп-

луатационным качествам – производительности, эффективности и надежности – не отвечает возрастающим требованиям промышленности. Создание новой, более совершенной техники и усовершенствование технологических приемов ее эксплуатации при хранении и переработке зерна встречает ряд трудностей, обусловленных многими причинами, важнейшие из которых следующие: многообразие сепарируемых материалов и способов сепарирования; сложность и разнообразие механических явлений взаимодействия частиц сепарируемых материалов друг с другом и с рабочим органом машины; недостаточное развитие теоретических основ сепарирования и инженерных методов расчета параметров процесса и машины.

Принцип воздушной сепарации использован во многих сепарирующих машинах, особенно в машинах для очистки зерновых культур. Объясняется это сравнительной простотой пневмосепарирующих устройств и разными аэродинамическими признаками примесей и зерновок. Однако идеально разделить смесь невозможно. Обычно в производственных условиях при очистке зерна средней засоренности эффективность выделения примесей составляет в среднем до 60-70% при четкости сепарирования до 2% /3/.

Основой разделения зернового материала при воздушном сепарировании является скоростная направленная тонкослойная подача зерна в воздушный поток. Это позволяет увеличить действующую на компоненты зернового материала аэродинамическую силу, повышая тем самым значимость данного признака разделения. Тонкослойная подача позволяет свести до минимума взаимодействие между компонентами, что существенным образом повышает эффективность работы воздушного потока.

Неравномерная подача зерна в воздушный поток способствует увеличению взаимодействия компонентов и вследствие этого приводит к снижению качества сепарации. Распределение нагрузки по ширине определяет степень использования канала и тем самым эффективность его работы. Помимо этого вследствие неравномерной загрузки по ширине появляются незагруженные участки, а так как сопротивление воздуха на этих участках падает, то происходит перераспределение структуры воздушного потока и, как следствие, нарушается процесс сепарации. Добившись равномерной подачи зернового материала, можно повысить качество сепарации и эффективность работы пневматического сепаратора.

От условий ввода зерновой смеси в канал во многом зависит эффективность процесса пневмо-

сепарирования. Зерновую смесь в канал современных пневмосепарирующих машин вводят в основном тремя способами: самотеком по наклонной направляющей под действием гравитационных сил и подпора зерна; вибрирующим лотком; рифлеными питающими валками-побудителями.

Как правило, механизмы подачи зерновой смеси в канал не предусматривают регулирование скорости ввода зерновок в канал и ориентации вектора этой скорости. Необходимо создать, с одной стороны, условие равномерной подачи зерновой смеси во времени, с другой – равномерное распределение зерновой смеси по фронту подачи.

Результаты экспериментальных данных зависимости эффекта очистки от начальной скорости подтверждают мнение о том, что оптимальное значение скорости зерновок C_0 находится в пределах 0,3-0,4 м/с /4/.

Следует отметить, что конструирование пневмосепарирующих устройств ведут без достаточно полного учета условий ввода зерновой смеси в канал, что подтверждается большими колебаниями значений $C_0=0,3-1,2$ м/с в различных машинах. В питающих устройствах с грузовыми клапанами различных модификаций начальная скорость определяется углом наклона направляющей, который выбирают близким к углу трения зерна о металлический скат, то есть 25-35°, что обеспечивает скорость входа зерновой смеси в пределах 0,25-0,50 м/с. Однако, как следует из вышеизложенного, угол, да и другие характеристики ввода зерна в канал должны быть строго обоснованы из условий равномерности скорости подачи и равномерности распределения зерновок по площади живого сечения канала, а также из условий оптимального распределения скорости воздуха по сечению канала. При такой подаче скорость ввода зерновой смеси в канал намного увеличивается и эффективность очистки снижается. Объясняется это примерным равенством моментов сил, открывающих клапан, и противодействующих сил.

Скорость C_0 устройств с вибрирующим лотком близка или несколько меньше оптимального значения. Подача зерновой смеси в канал при помощи вибрирующих лотков при определенных условиях способствует самосортированию зерновой смеси и вводу ее в канал в виде многослойного потока /5/.

При подаче зернового материала питающими валками или подающими устройствами скорость C_0 поддерживают кинематическим режимом валка. Питатель воздушного сепаратора должен равномерно распределять зерновой материал по ши-

рине, по глубине и по времени в пневмосепарирующем канале. При этом травмирование зерна должно быть минимальным, а мощность на привод не должна быть велика по значению, так как предполагается возможность использования его в небольших фермерских хозяйствах.

Этим требованиям, предъявляемым к питателям пневматических сепараторов, в основном соответствуют вальцевые, лопастные, ленточные, вентиляторные и дисковые питатели.

Широкое распространение получили ленточные питатели. В современных конструкциях пневмосепараторов используются, как правило, одноленточные и двухленточные питатели. Одноленточные питатели с прямолинейной лентой не способны обеспечить разгон компонентов до высокой скорости из-за аэродинамического сопротивления воздушной среды. Для обеспечения высокой скорости вбрасывания зернового сырья в воздушный канал ворох прижимается к ленте нажимным роликом. Причиной неудовлетворительной очистки зернового вороха при помощи зернопульты является низкая скорость компонентов в неподвижную воздушную среду, вследствие чего скорость движения тяжелых компонентов относительно воздуха не превышает скорости их витания.

При экспериментальном исследовании работы питателя обнаружена его склонность к повышению связности компонентов зерновой смеси на питающем транспортере, а также к порционному отрыву при переходе на ленту ускорителя, что приводит к вбрасыванию зернового сырья в воздушный канал не равномерным потоком, а порциями. Следствием этого является значительное снижение качества сепарации.

Вентиляторный питатель предназначен для разгона зерновых материалов перед их вбрасыванием в неподвижную воздушную среду. Одним из основных недостатков вентиляторного питателя является низкий коэффициент полезного действия, так как для разгона тяжелых компонентов зернового сырья необходима значительная длина трубы. Это ведет к повышению металлоемкости и, в конечном счете, стоимости машины в целом.

Дисковые питатели предназначены в основном для разбрасывания материалов по кругу. Конусные дисковые питатели широко применяются в пневмоцентробежных очистках, но по принципу работы они не могут быть использованы для вбрасывания зернового материала в прямоугольный воздушный канал.

Вальцевые питатели представляют собой два ролика, вращающиеся с одинаковой скоростью в раз-

ные стороны. К достоинствам такого питателя можно отнести компактность и простоту конструкции.

Однако наряду с преимуществами есть и недостатки, присущие всем вальцевым питателям. Так, зазор на входе вальцевых питателей остается неизменным, что приводит в случае перегрузки к травмированию зерна. Также при перегрузке снижается скорость вращения вальцов и, следовательно, не обеспечивается необходимая скорость вбрасывания /4/.

Наиболее широкое распространение получили лопастные питатели. Применение лопастных питателей для подачи зернового материала исследовано в меньшей степени. В сравнении с другими питателями лопастные имеют ряд существенных преимуществ (простота конструкции, технологическая и конструктивная надежность, небольшие габаритные размеры). Такой питатель может подавать компоненты сырья как в подвижную, так и в неподвижную струю. Недостатком данного типа питателя является то, что он подает зерновой материал с недостаточной равномерностью и распределением по площади поперечного сечения воздушного канала. Зерновой материал, выброшенный из лопастного питателя, имеет довольно большой угол разброса. Кроме того, лопастной питатель не обеспечивает подачу с одним и тем же углом и с одинаковой скоростью компоненты зернового материала.

Таким образом, на основе подробного анализа существующих питателей, качественных показателей их работы была сформулирована проблема по исследуемому вопросу и поставлены задачи для ее решения. Была разработана рабочая научная гипотеза, которая должна перерасти в стройную теорию по данному вопросу. Задача совершенствования питателей воздушных сепараторов заключается в создании питателей, подающих зерновую смесь в воздушный канал, равномерно распределяющих ее по площади поперечного сечения при разных скоростях воздушного потока, что в итоге позволяет повысить эффективность работы питающего устройства, а значит и всего процесса сепарирования в целом.

Задачами для решения этой проблемы являются:

- обоснование выбора рационального типа питателей, обеспечивающих равномерное распределение зерна по живому сечению рабочего аэродинамического канала сепаратора;

- обоснование основных параметров питателя, отвечающих всем требованиям к подаче зерновой смеси в воздушный поток рабочей аэродинамической трубы сепаратора;

– разработка конструкции питателя пневмосепаратора, отвечающего требованиям к очистке как товарного, так и семенного зерна.

Решение этих задач должно осуществляться путем создания пневмосепарирующего канала с одним или с двумя поперечными окнами для ввода сепарируемого материала. В канал через окна должен непрерывно подаваться материал с помощью питателей, обеспечивающих равномерное распределение по всему его сечению.

Следуя теории равномерности распределения профессора Коврикова И.Т. /6/, исследования сводятся к изысканию рациональных методов выполнения требований, предъявляемых в общем виде целевой функции:

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n U_{ij} K_{ij} \rightarrow \max, \quad (3)$$

где U_{ij} – дополнительный эффект от улучшения равномерности распределения значений дальности полета элементов зерновой смеси подаваемых i -м элементом подающего рабочего органа на j -м участке;

K_{ij} – коэффициент эффективности влияния каждого i -го элемента на каждом j -м участке сечения канала.

Принимая каждый элемент зерновой смеси за материальную точку и пренебрегая сопротивлением воздуха на участке в пределах питателя ($v \cong 1,5 \dots 1,7$ м/с, допускаются при этом ошибки 0,6...0,7%), дифференциальные уравнения движения их можно записать в виде:

$$\frac{md^2x}{dt^2} = 0; \quad \frac{md^2y}{dt^2} = mg, \quad (4)$$

где m – масса элемента зерновой смеси.

После двойного интегрирования системы уравнений (4) при начальных условиях движения и исключив из уравнения параметр t , получим уравнение траектории элемента зерновой смеси после схода с подающего устройства (питателя):

$$Z_{\text{тр}} = \operatorname{tg} \alpha_0 (x - x_0) - \frac{g(x - x_0)^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha_0} + Z_0, \quad (5)$$

где v_0 – начальная скорость движения элементов смеси после схода;

α_0 – угол начальной скорости v_0 к горизонту;

Z_0 – высота установки питателя относительно рассматриваемой плоскости сечения воздушного канала;

x_0 – величина выхода элемента подачи в воздушный канал ($x_0 \rightarrow 0$).

Абсциссой точки пересечения траектории полета с плоскостью рассматриваемого сечения канала является дальность полета элемента зерновой

смеси в пределах воздушного канала, которая определится из (5), приняв $z=0$:

$$1 = \frac{x_0^2 \sin 2\alpha_0}{2g} + \frac{1}{g} \sqrt{v_0^2 \sin^2 \alpha_0 + 2gz_0} + x_0. \quad (6)$$

Следовательно, с учетом (5) условие удовлетворительного распределения элементов зерновой смеси по площади рассматриваемого сечения воздушного канала сепаратора запишется в виде:

$$x_0 + \frac{v_0^2 \sin 2\alpha_0}{2g} + \sqrt{v_0^2 \sin^2 \alpha_0 + 2gz_0} \geq x_j, \quad (7)$$

где x_j – расстояние до элементарного участка j -го участка поперечного сечения воздушного канала.

Исходя из вышеизложенной теории вопроса равномерного распределения элементов зерновой смеси по всему поперечному сечению воздушного канала, условие (7) можно осуществить, например, питателем в виде устройства, состоящего из системы подающих элементов, имеющих параметры, обеспечивающие подачу зерновой смеси на каждый j -й участок поперечного сечения. Такой системой может быть, например, набор различных по диаметру цилиндрических катушек с лопастями, одинаковыми по длине, причем образующая лопастей выполнена по брахистохроне, обеспечивающей необходимый поток с минимумом затрачиваемой энергии. Лопастей должны быть направлены не радиально, а отклонены от нормали в сторону, обратную вращению вала питателя. Они образуют ячейки подающего устройства.

Равномерность распределения очищаемого сырья по сечению канала обеспечивается тем, что лопастные катушки с разными диаметрами и соответствующими параметрами подают зерновую смесь равномерно по каждому j -му сечению.

Чередующееся расположение катушек на общем валу позволяет распределить зерновой материал равномерно по ширине пневмосепарирующего канала, а глубина ячеек валика равна сумме глубин ячеек цилиндрических катушек. Поэтому цилиндрические катушки образуют струи продукта глубиной, которая меньше глубины пневмосепарирующего канала, что позволяет равномерно распределить зерновой материал по глубине канала. Исполнение катушек цилиндрическими способствует лучшему расслоению и распределению зернового материала по каналу. Такое расположение лопастей на валике катушки в случае износа лопастей обеспечит им высокую ремонтпригодность.

Как показали наши предварительные испытания, при подаче зернового материала экспериментальным питателем происходит равномерное его

распределение по глубине и ширине пневмосепарирующего канала, вследствие чего достигается более высокий эффект очистки, а следовательно, повышается качество сепарирования и производительности. При начальной скорости C_0 , равной 0,4-0,5 м/с эффективность очистки 60-70%, что соответствует оптимальным значениям.

Полученные научные положения о сущности различных процессов сепарирования обуславливают не только создание новых машин, но и обоснование оптимальных параметров эксплуатации имеющихся машин, сокращение сроков внедрения новой техники, усовершенствование технологических процессов хранения и переработки зерна.

Список использованной литературы:

1. Урюпин С.Г. Разработка конструкции и обоснование параметров пневмосепарирующего канала для зерноочистительных машин. Диссертация в виде научного доклада на соискание ученой степ. канд. техн. наук. Оренбург, 1997.
2. Малис А.Я. и Демидов А.Р. Машины для очистки зерна воздушным потоком. – М., Машгиз, 1962. – 176 с.
3. Гортинский В.В. и др. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях. – М.: Колос, 1980 – 304 с.
4. Степичев М.Г. Исследование процесса разделения мелкого соломистого вороха встречным воздушным потоком; Автореф. дис. канд. техн. наук. Челябинск, 1989.
5. Демский А.Б., Веденьев В.Ф. Основные направления совершенствования пневмосепарирующего зерноочистительного оборудования. ЦНИИТЭИлегпищемаш, 1976. – 74 с.
6. Ковриков И.Т. Обоснование некоторых параметров распределителя семян, // Техника в сельском хозяйстве. 1976. №4. С. 26-28.