УДК 631.362

О. Н. Пчелинцева, канд.техн.наук., доц.
Пензенский государственный технологический университет, Россия
Тел./Факс.(8 841 2)49-56-99; E-mail PchelincevaON@yandex.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЧАСТЕЙ ВИБРОПНЕВМОСЕПАРАТОРА С ЗЕРНОВОЙ МАССОЙ

В статье описана конструкция вибропневмосепаратора с принципиально новыми конструктивными элементами, которые позволяют значительно повысить коэффициент очистки пшеницы от спорыньи и при этом сократить потери годного зерна.

Ключевые слова*: *вибропневмосепарирование, зерновая масса, сетчатая дека, рабочая камера, амплитуда колебаний, циркуляционные потоки.

O. N. Pchelintseva

MATHEMATICAL MODEL OF INTERACTION OF CONSTRUCTIVE PARTS IBROPNEVMOSEPARATORA WITH GRAIN WEIGHT

This article describes the construction of vibropnevmoseparator with innovative structural elements that allow to considerably increase the cleaning factor of wheat from ergot and reduce the loss of grain quality.

Key words: *vibropnevmoseporation, grain weight, net, working the camera, amplitude, circulation flows.*

.

1.Введение

Как показало большинство исследований, составить конкретную математическую модель процесса вибропневмосепарирования возможно только при заданных параметрах колебаний для отдельной материальной частицы. Плотность основного зерна значительно меньше плотности минеральной примеси и процентное содержание минеральной примеси к общей массе очищаемого зерна составляет менее 1 %. Плотность зерновок пшеницы и рожков спорыньи принимает очень близкие значения. Основную часть зерновой смеси, поступающей на вибросепарирование, составляет годное зерно, которое выступает в качестве более плотной фракции. Таким образом, полученные ранее данные о процессе очистки пшеницы от спорыньи требуют дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Целью исследования являлось составление математической модели процесса вибропневмосепарирования, позволяющую определить теоретическую производительность вибропневмосепаратора для очистки пшеницы от спорыньи.

Задача исследований – определить условия возникновения перемещения частицы, разработать схему движения зерновой массы в рабочей зоне вибпропневмосепаратора, установить от чего зависит теоретическая производительность вибропневмосепаратора.

2.Основное содержание и результаты работы (The main contents and outcomes of activity)

При вибрациях ассиметрия возбуждения за счет наклона плоскости колебаний является основной причиной направленного в среднем движения по наклонной поверхности. При этом сила трения в случае положительного направления горизонтальной проекции силы инерции в переносном движении уменьшается в результате уменьшения нормального давления.

Сила трения соответственно увеличивается при противоположном направлении этой проекции.

Вибпропневмосепаратор (далее ВПС), в процессе вибропневмосепарирования, совершает поступательные колебания, направление которых образует с поверхностью угол β. Таким образом, происходит перемещение зерновой массы по сетчатой деке

ВПС, за счет действия добавочной силы, роль которой выполняет сила инерции в переносном движении, определяемая по формуле:

$$P_{И} = ma_{П} \quad (1)$$

где m – масса частицы; $a_{П}$ – переносное ускорение.

На основе проведенных теоретических исследованиях можно сделать вывод, что наиболее целесообразно для описания движения зерновой массы на сетчатой деке ВПС использовать метод замены зернового потока отдельной материальной частицей [1, 2].

После получения математической зависимости для отдельной материальной частицы, вносят поправочные коэффициенты на основе дополнительных экспериментальных исследований. Поправочные коэффициенты позволяют учесть влияние неучтенных факторов в математической модели.

На рис. 1 представлена схема сил, действующих на материальную частицу, находящуюся на сетчатой деке ВПС.

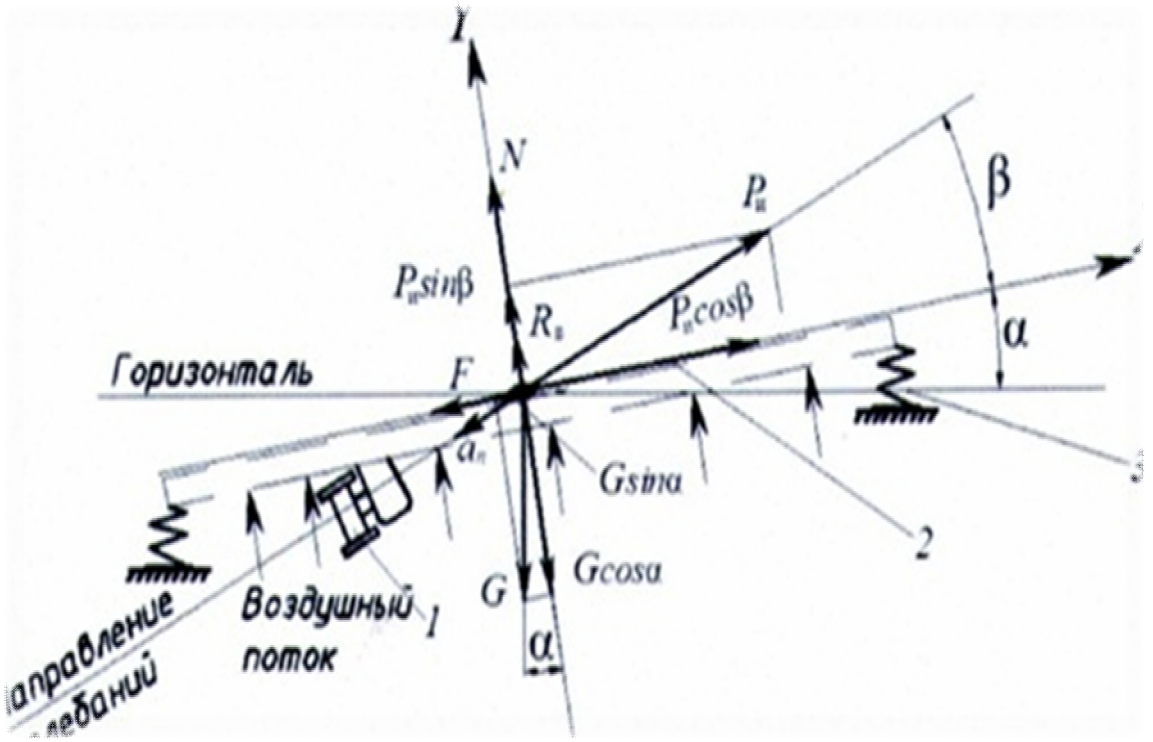

Рис. 1. Схема сил при вибрационном перемещении частицы в случае наклонных гармонических колебаний. 1 – электровибратор; 2 – сетчатая дека; 3 – виброопоры

На частицу действуют следующие силы:

– сила тяжести частицы – G = mg;

– полная реакция деки, отклоненная от нормали к ее поверхности на угол трения – N;
– сила инерции в переносном движении – P_u;
– реакция восходящего воздушного потока – $P_в$, действующая нормально к поверхности деки.

Учитывая, что дека ВПС совершает поступательные периодические колебания, подчиняющиеся гармоническому закону, P_uопределяется по формуле:

$$P_И = mA\omega^2 \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad (2)$$

где А – амплитуда колебаний сетчатой деки, м; ω – циклическая частота колебаний, $с^{-1}$; t – время, с; φ – начальная фаза колебаний.

Для данной схемы сил дифференциальные уравнения относительного движения частицы запишутся в виде:

$$\left.\begin{aligned} m\frac{d^2x}{dt^2} &= P_И \cos\beta - G\sin\alpha - F \\ m\frac{d^2y}{dt^2} &= P_И \sin\beta - G\cos\alpha + N + R_в \end{aligned}\right\}. \quad (3)$$

Учитывая, что $G = mg, F = mg,$ систему уравнений (3) можно переписать в виде:

$$\left.\begin{aligned} m\frac{d^2x}{dt^2} &= mA\omega^2 \sin\omega t\cos\beta - mg\sin\alpha - fN \\ m\frac{d^2y}{dt^2} &= mA\omega^2 \sin\omega t\sin\beta - mg\cos\alpha + N + R_в \end{aligned}\right\}. \quad (4)$$

Для движения без подбрасывания $\frac{d^2y}{dt^2} = 0,$ что позволяет из уравнения (4) выразить нормальную реакцию N.

$$N = mg\cos\alpha - mA\omega^2 \sin\omega t\sin\beta - R_в. \quad (5)$$

Можно теоретически определить условие безотрывного движения зерновой массы по сетчатой деке ВПС, используя уравнение (5). Режим безотрывности отличается тем, что за весь период колебания *T*, нормальная реакция *N* сохраняет положительное значение, т.е. $N > 0,$ даже когда $\sin\omega \cdot t = 1.$ Таким образом, для выполнения условия безотрывности необходимо соблюдение следующего неравенства:

$$mg\cos\alpha - mA\omega^2 \sin\omega t\sin\beta - R_в > 0. \quad (6)$$

Преобразовывая выражение получаем:

$$\frac{m(g\cos\alpha - A\omega^2\sin\beta)}{R_в} > 1. \quad (7)$$

Предлагается автором [1] использовать формулу Ньютона для определения реакции восходящего воздушного потока на частицу:

$$R_в = k_\beta \rho_в F_м (v_1 - v_2)^2, \quad (8)$$

где k_β – коэффициент сопротивления; $\rho_в$ – плотность воздуха, кг/м^3; $F_м$ – миделево сечение, м^2; v_1 – скорость воздушного потока, м/с; v_2 – скорость частицы, м/с.

Автор [3] в своей работе вводит понятие «скорость витания частицы в стесненных условиях». Учитывая это понятие формулу (8) можно привести к виду:

$$R_в = mg\frac{(v_1 - v_2)^2}{C_S^2}, \quad (9)$$

где C_S – скорость витания частицы в стесненных условиях.

Скорость витания частицы в стесненных условиях определяется по формуле:

$$C_S = \sqrt{\frac{4}{3}\cdot\frac{g d_э(\rho_ч - \rho_в)^2}{\rho_в k_\beta}}, \quad (10)$$

где $d_э$ – эквивалентный диаметр частицы, м; $\rho_ч$ – плотность частицы, кг/м^3; $\rho_в$ – плотность воздуха, кг/м^3; k_β – коэффициент сопротивления.

Тогда неравенство (7) можно записать в виде:

$$\frac{4d_э(\rho_ч - \rho_в)^2(g\cos\alpha - A\omega^2\sin\beta)}{3\rho_в k_\beta(v_1 - v_2)^2} > 1, \quad (11)$$

При условии выполнения неравенства (11) частица перемещается по сетчатой деке безотрывно.

Для того чтобы решить систему уравнений (4) необходимо подставить в верхнее уравнение системы нормальную реакцию *N* определяемую по уравнению (5). Тогда верхнее уравнение системы (4) примет вид:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = A\omega^2(\cos\beta + f\sin\beta) - g(\sin\alpha + f\cos\alpha). \quad (12)$$

При условии, что $f = tg\rho$ формула (12) приводится к виду:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = A\omega^2\frac{\cos(\beta - \rho)}{\cos\rho}\left[\sin\omega t - \frac{g}{A\omega^2}\frac{\sin(\alpha + \rho)}{\cos(\beta - \rho)}\right]. \quad (13)$$

Выражение (13) соответствует положительному направлению скорости частицы. В случае противоположного направления частицы данное уравнение примет вид:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = A\omega^2\frac{\cos(\beta + \rho)}{\cos\rho}\left[\sin\omega t - \frac{g}{A\omega^2}\frac{\sin(\alpha - \rho)}{\cos(\beta + \rho)}\right]. \quad (14)$$

Среднюю скорость частицы рассматривают как сумму перемещений частицы вверх и вниз за один период колебаний отнесенных ко времени данных перемещений. Среднюю скорость частицы можно определить по формуле:

$$v_ч = \frac{S_в + S_H}{T_0} = \frac{n}{60}(S_в + S_H) \quad (15)$$

где $S_в$ – перемещения частицы вверх за один период изменения силы F, м; S_H – перемещения частицы вниз за один период изменения силы F, м; T_0 – период изменения силы F, с; n – число периодов изменения силы F за 1 мин.

Решая системы уравнений, подобные системе (3), В.В. Гортинским была определена средняя скорость частицы, находящейся на наклонной поверхности, совершающей гармонические колебания:

$$v_ч = A\omega\cos\beta\cos\varepsilon\sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon z}{\sin\varepsilon}\right)^2}\left[\frac{2}{\pi}f\,\mathrm{tg}\beta\left(\mathrm{tg}\varepsilon - \varepsilon + \frac{\pi}{2}\right) - 1\right], \quad (16)$$

где z – коэффициент, определяемый по формуле 17:

$$z_\pm = \frac{g}{A\omega^2}\frac{\sin(\alpha \mp \rho)}{\cos(\beta \mp \rho)}, \quad (17)$$

В формуле (17) верхние знаки перед ρ соответствуют положительному направлению движения частицы $(x > 0)$, нижние – отрицательного направления $(x < 0)$.

Коэффициент ε определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\delta_{2+} - \delta_{1+}}{2}, \tag{18}$$

где $\delta = \omega t$ – фазовый угол.

В данный момент δ_{1+} – это фазовый угол, при котором начинается относительное скольжение частицы в положительном направлении $\left(\frac{d_2 x}{dt^2} \geq 0\right)$,

а δ_{2+} – фазовый угол, при котором движение в положительном направлении заканчивается.

Так как выражение (16) не учитывает влияние восходящих воздушных потоков и взаимодействие с конструктивными элементами вибропневмосепаратора, теоретическая скорость, определяемая этим выражением не соответствует действительной скорости перемещения частицы по сетчатой деке разработанного ВПС. С точки зрения практики наибольший интерес представляет определение теоретической производительности ВПС. Теоретическая производительность является одним из показателей эффективности работы ВПС.

Среднюю скорость перемещения зерновой массы по сетчатой деке определяют, исходя из условия неразрывности зернового потока, по формуле:

$$v_{\text{ср}} = \frac{Q}{B \cdot h_{\text{дин}} \cdot \rho_{\text{н}}}, \tag{19}$$

где $v_{\text{ср}}$ – средняя скорость перемещения зерновой массы по сетчатой деке, м/с; Q – нагрузка на рабочий орган, кг/с; В – ширина канала, м; $\rho_{\text{н}}$ – насыпная плотность зерновой массы, кг/м^3; $h_{\text{дин}}$ – высота слоя в динамике, м.

При работе ВПС в процессе сепарирования высота слоя продукта на сетчатой деке остается постоянной, поэтому нагрузка на сетчатую деку равна производительности. Под шириной канала В понимают ширину выходного патрубка ВПС. Высота слоя в динамике $h_{\text{дин}}$, учитывая конструктивные особенности, равняется высоте выходного патрубка ВПС. Тогда формулу (19) относительно удельной производительности записывают в виде:

$$Q = 36 \cdot v_{\text{ср}} \cdot \rho_{\text{н}} \cdot h, \tag{20}$$

где h – высота зазора между нижней кромкой отбойной пластины и сетчатой деки, м.

Принимая во внимание среднюю скорость перемещения зерновой массы, равную средней скорости отдельной частицы, удельная теоретическая производительность ВПС определяется по формуле:

$$Q = 36 \cdot k \cdot \rho_{\text{н}} \cdot h \cdot \left[A\omega \cos\beta \cos\varepsilon \sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon z}{\sin\varepsilon}\right)^2} \left[\frac{2}{\pi} f \operatorname{tg}\beta \left(\operatorname{tg}\varepsilon - \varepsilon + \frac{\pi}{2}\right) - 1\right]\right], \tag{21}$$

где k – безразмерный коэффициент, учитывающий изменения угла наклона сетчатой деки и увеличения объема зерновой массы под действием восходящих потоков воздуха.

Коэффициент k был определен опытным путем:

$$k = -523{,}316 - 240{,}576 \cdot б + 4{,}045 \cdot H - 12{,}597 \cdot б^2 + 0{,}775 \cdot б \cdot H - 0{,}0074 \cdot H^2, \quad (22)$$

где Н – избыточное давление в рабочей камере ВПС, Па.

На рис. 2 представлена графическая зависимость удельной производительности ВПС от коэффициента очистки.

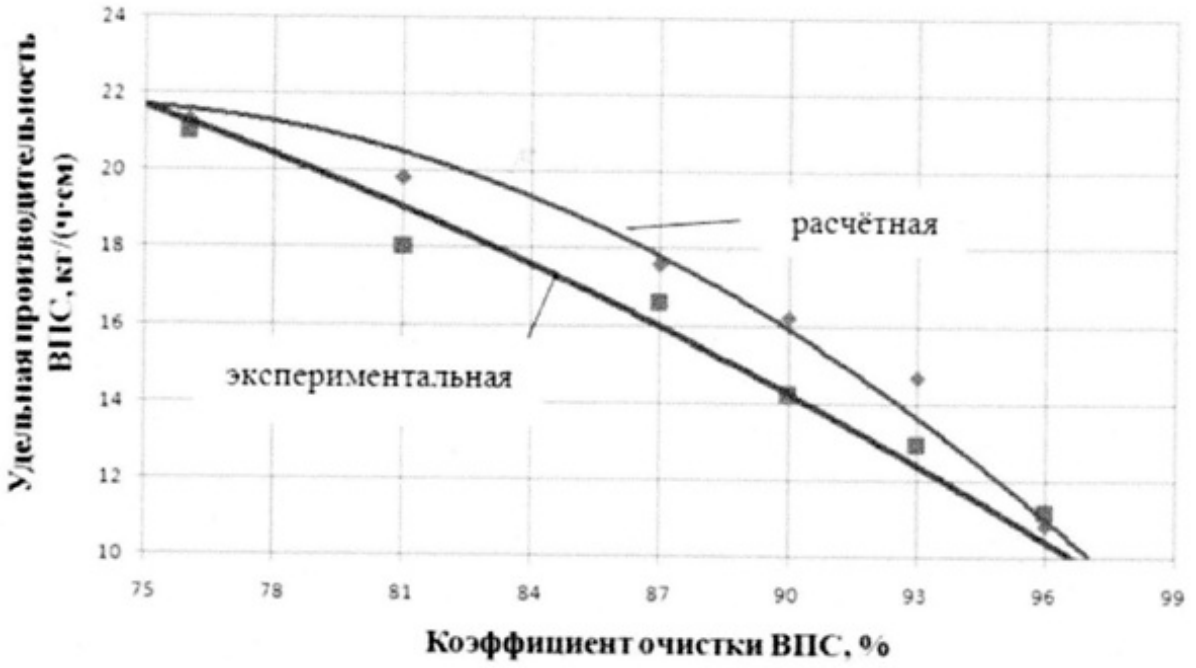

Рис. 2. Зависимость удельной производительности ВПС от коэффициента очистки

Результаты проведения экспериментов подтверждают данные, полученные расчетным путем. Сравнение практических и теоретических результатов по определению производительности ВПС показало, что разница в результатах не превышает 5%.

Проводя анализ выражения (21) можно сделать вывод, что в действительном виде производительность ВПС зависит только от амплитуды колебаний сетчатой деки. Доказательство же влияния других режимно-конструктивных факторов требует дополнительных экспериментальных исследований.

Нижний слой зерновой массы, соприкасающийся с сетчатой декой, под воздействием вибрации и восходящих потоков воздуха перемещается против уклона к выходному патрубку для годного зерна. Параллельно происходит процесс самосортирования – менее плотная фракция (спорынья) «выходит» на поверхность. Верхний слой зерновой массы вместе со спорыньей движется в противоположную сторону к выходному патрубку для примесей. Достигая нижней стенки корпуса ВПС зерновой поток «закручивается», создавая циркуляцию, т.е. опять перемещается против уклона сетчатой деки к выходному патрубку для годного зерна. «Закручивание» спорыньи является одной из главных причин снижения эффективности процесса очистки пшеницы от спорыньи, т.к. спорынья не успевает накапливаться у выходного патрубка для примесей.

На основе теоретических знаний процесса вибропневмосепарирования и наблюдения за экспериментальной работой ВПС составлена схема движения компонентов

зерновой массы внутри рабочей зоны ВПС. На рис. 3 представлена схема циркуляционных потоков зерновой массы внутри рабочей зоны разработанного ВПС. [2,5]

Сетчатую деку условно разделяют на две зоны. В первой зоне происходит одновременное перемещение вдоль деки и расслоение компонентов зерновой массы по различию плотностей и коэффициентов трения, под воздействием вибрации и восходящих потоков воздуха.

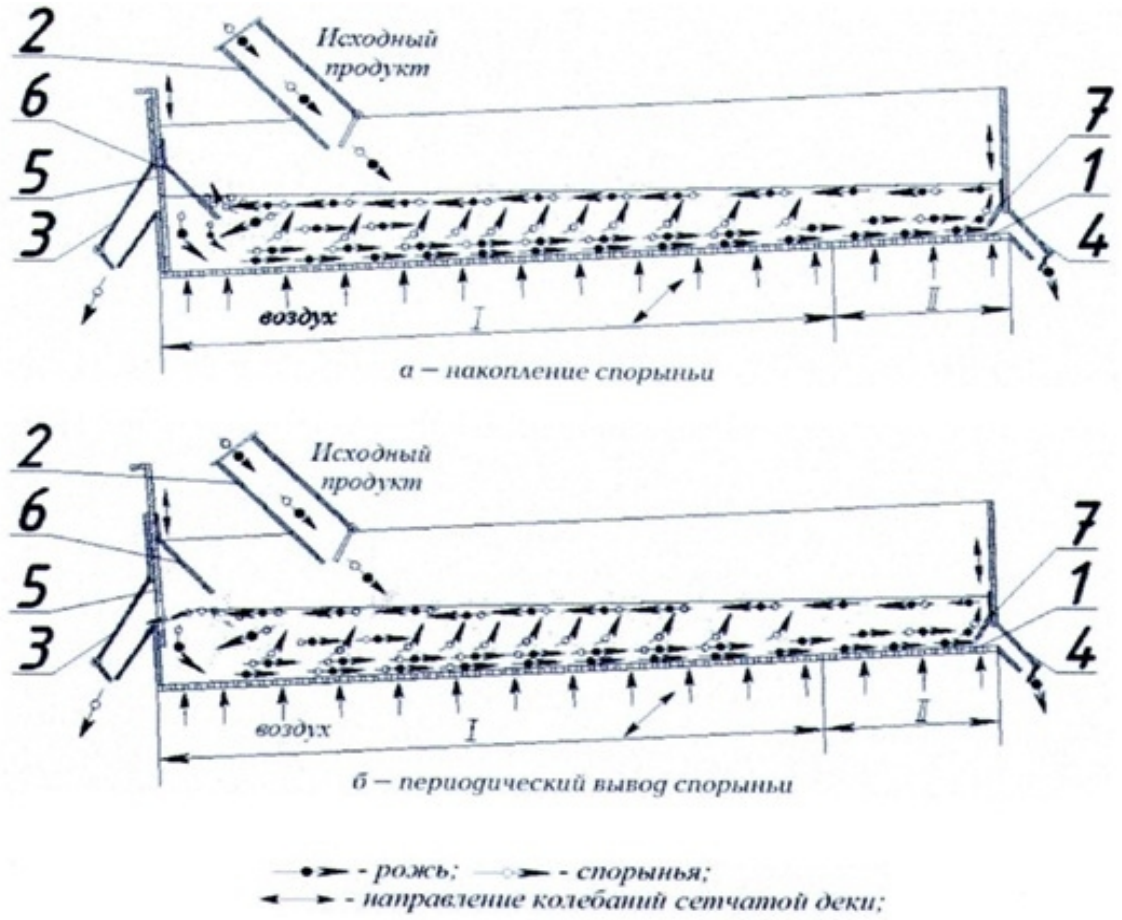

Рис. 3. Схема циркуляционных потоков зерновой массы внутри рабочей зоны ВПС при наличии отражающей и отбойной пластин
1 — сетчатая дека; 2 — загрузочный патрубок; 3 — выходной патрубок для примесей; 4 — выходной патрубок для годного зерна; 5 — отражающая пластина; 6 — отогнутая часть отражающей пластины; 7 — отбойная пластина.

Во второй зоне происходит перемещение более плотной фракции к выходному патрубку. При правильно настроенном процессе для обеспечения высокой степени очистки, рожки спорыньи не должны достигать второй зоны.

Существующие конструкции ВПС имеют постоянный вывод фракции примесей из рабочей зоны ВПС. Одним из недостатков этих конструкций является то, что в выходной патрубок для примесей вместе со спорыньей уходит большое количество годного зерна, находящегося на поверхности зерновой массы. Также в выходной патрубок для годного зерна попадает спорынья, которая не успела переместиться на поверхность зерновой массы за время продвижения вдоль сетчатой деки, это является вторым не-

достатком современных конструкций, что приводит к снижению коэффициента очистки.

Для устранения этих недостатков конструкция спроектированного ВПС имеет ряд существенных конструктивных преобразований [3, 4], которые помогают повысить степень очистки пшеницы от спорыньи, а также сокращают потери годного зерна, уходящего в примеси.

Отличия разработанного ВПС от существующих конструкций заключаются в следующем:

- наличие отбойной пластины у выходного патрубка для годного зерна;
- наличие отражающей пластины у выходного патрубка для спорыньи;
- периодический вывод накопившейся у отражающей пластины спорыньи.

На рис. 3а представлена схема циркуляционных потоков зерновой массы внутри рабочей зоны ВПС при наличии отражающей и отбойной пластин.

Отражающая пластина 5 установлена перед выходным патрубком для примесей, выполнена с возможностью вертикального перемещения и погружена отогнутой частью 6 на 30 – 50 мм в зерновую массу. Одна грань отражающей пластины 5 перпендикулярна сетчатой деке, а другая грань образует с сетчатой декой тупой угол. Величина погружения отогнутой части пластины в зерновую массу на 30 – 50 мм определена исходя из того, что вся спорынья возле выходного патрубка для примесей сконцентрирована только в верхних слоях зерновой массы. Отбойная пластина 7 установлена перед выходным патрубком для годного зерна 4, образуя зазор 20 – 30 мм между поверхностью сетчатой деки 1 и нижней гранью отбойной пластины 7, выполнена в виде изогнутой металлической пластины. Зазор 20 – 30 мм между поверхностью сетчатой деки 1 и нижней гранью отбойной пластины 7 определен исходя из того, что в процессе вибропневмосепарирования наиболее плотная фракция (годное зерно) опускается в нижнюю часть зерновой массы и, соприкасаясь с сетчатой декой, перемещается против уклона к выходному патрубку для годного зерна. Таким образом, образуется зазор между нижней гранью отбойной пластины и сетчатой поверхностью. Через этот зазор проходит только наиболее плотная фракция – годная пшеница, тем самым исключается прохождение рожков спорыньи, которые не успели «всплыть» и находятся в средних слоях зерновой массы.

Из схемы, изображенной на рис. 3а видно, что благодаря отражающей пластине спорынья накапливается у выходного патрубка для примесей, что создает возможность для ее дальнейшего вывода из рабочей зоны ВПС. Когда происходит накопление достаточного количества спорыньи возле выходного патрубка для примесей 3, отражающая пластина 5 поднимается по направляющим, позволяя спорынье свободно выходить в выходной патрубок 3. Время поднимания отражающей пластины, должно обеспечивать полный вывод накопившейся спорыньи. После этого отражающая пластина опускается, и накопление спорыньи происходит снова.

На рис. 3,б изображена схема циркуляционных потоков зерновой массы внутри рабочей зоны ВПС в момент вывода фракции примесей. Этому процессу соответствует крайнее верхнее положение отражающей пластины. Исходя из рисунка видно, что наличие отражающей пластины обеспечивает периодический вывод спорыньи из рабочей зоны ВПС. Это позволяет добиться значительного сокращения потерь годного зерна, уходящего в патрубок для примесей.

Заключение

В результате проведенных исследований были определены условия возникновения перемещения частицы по сетчатой деке вибропневмосепаратора в зависимости от силового воздействия на отдельную частицу. Так же получена математическая модель, которая описывает изменение производительности ВПС для разделения сыпучих продуктов в зависимости от амплитуды, частоты и направления колебаний сетчатой деки, ее угла наклона и давления в рабочей камере разработанного вибропневмосепаратора. В работе была описана конструкция ВПС с принципиально новыми конструктивными элементами, которые позволяют значительно повысить коэффициент очистки пшеницы от спорыньи и при этом сократить потери годного зерна. Разработанная схема движения зерновой массы в рабочей зоне ВПС, учитывает циркуляционные потоки, возникающие в процессе вибропневмосепарирования, а также взаимодействие конструктивных частей вибропневмосепаратора с зерновой массой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авроров В. А., Ловцева В. В. Моделирование условий движения сыпучих материалов // Научно-методический журнал: XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего. – Пенза: ПензГТУ, 2014. – № 3. – С. 43–50.

2. Васильев А. М., Волков А. С., Киракосян Д. В. Уравнения вибрационного движения частицы на наклонной рифленой опорной поверхности сепарирующих машин // Хранение и переработка сельхозсырья. 2012. – №11

3. Глебов Л. А. Технологическое оборудование и поточные линии предприятий по переработке зерна / Л. А. Глебов, А. Б. Демский, В. Ф. Веденьев, А. Е. Яблоков. – М.: ДеЛи принт, 2010 – 696 с.

4. Остриков А. Н. Процессы и аппараты пищевых производств : учеб. для вузов / А. Н. Остриков, О. В. Абрамов, А. В. Логинов [и др.] ; под ред. А. Н. Острикова. — СПб.: ГИОРД, 2012. — 616 с.

5. Устройство для разделения сыпучих продуктов по плотности: пат. №11598 Респ. Беларусь, МПК B 07 B 4/08/ А. В. Иванов, В. М. Поздняков; заявитель Могилевский гос. ун-т продовольствия – № a20070011; заявл. 10.01.07.; опубл. 28.02.09

Поступила в редколлегию 19.01.2016 г.