

The mathematical description of grain weight with gravity separator's constructive elements

Vladimir Pozdnyakov, Sergei Zelenko

Belarusian state agrarian technical university, Minsk, Republic of Belarus

ABSTRACT

Keywords:

Separator
Vibration
Grain
Impurities

Article history:

Received 01.03.2013
Received in revised form
21.04.2013
Accepted 26.04.2013

Corresponding author:

Vladimir Pozdnyakov
E-mail:
bgatu-nii@tut.by

Process of vibropneumatic separation is widely used by preparation of sowing parties of seeds of grain crops at the enterprises which are engaged in seed farming, preparation and storage of seeds, grain processing. Problem of grain separation in the fluidized bed is to separate the components of the grain mass to a minimum density difference (10-20%). There is a need for analysis and mathematical description of the interaction of grain mass with a mesh deck of vibropneumatic separator. This is necessary to determine the optimal operating and design parameters of grain-cleaning equipment.

The scheme of the forces acting on the particles on an inclined surface due to vibration and ascending air streams is considered, as a result of the power analysis, movement conditions of particle on mesh deck of vibropneumatic separator depending on impact on a separate particle defined.

Received and confirmed experimentally obtained mathematical model for determining the specific productivity of vibration pneumatic separator depend on the amplitude, frequency and vibration direction mesh deck, its inclination angle and pressure in the working chamber of vibropneumatic separator.

The research results can be used in the construction of grain-cleaning equipment designed for cleaning of grain weight from other hardly separable impurity.

УДК 664.726.9

Математическое описание взаимодействия зерновой массы с конструктивными элементами вибропневмосепаратора

Владимир Поздняков, Сергей Зеленко

*Белорусский государственный аграрный технический университет,
Минск, Республика Беларусь*

Введение

Составление математической модели процесса сепарирования зерновой массы под воздействием вибрации и восходящих воздушных потоков возможно только для отдельной материальной частицы и при заданных параметрах колебаний. В теоретической схеме процесса перемещения зерновой массы по сетчатой деке [1,2] не учтены все факторы, влияющие на процесс. К тому же в данных исследованиях рассматривалась очистка зерновой массы от минеральной трудноотделимой примеси, плотность которой значительно больше плотности основного зерна и процентное содержание минеральной примеси к общей массе очищаемого зерна относительно невелико (менее 1%). Плотность же зерновок ржи и рожков спорыньи очень близка, причем в качестве более плотной фракции выступает годное зерно, составляющее основную часть зерновой смеси, поступающей на вибросепарирование. Следовательно, возможность применения полученных ранее выводов для процесса очистки ржи от спорыньи требует дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Методы исследований

Для вывода математической модели применён метод силового анализа поведения отдельной частицы на сетчатой деке вибропневмосепаратора под воздействием вибрации и восходящих потоков воздуха.

Для экспериментальных исследований процессов сортирования зерновой массы по удельной плотности в псевдооживленном слое на основе законов физического моделирования разработан экспериментальный стенд (рис. 1)

На разработанном стенде получены данные, позволяющие подтвердить адекватность полученных математических моделей.

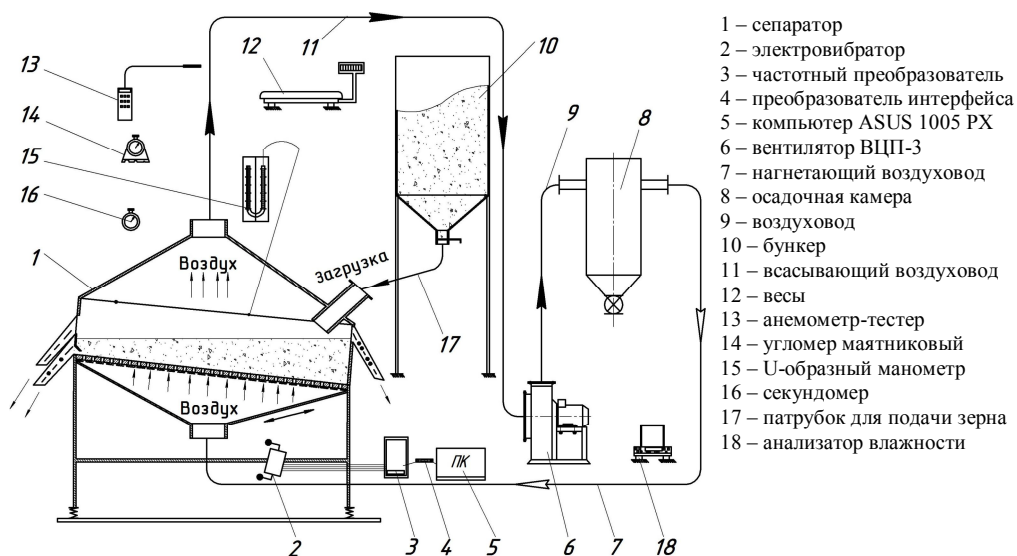


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

Процеси та обладнання харчових виробництв

В качестве исследуемого материала при проведении экспериментальных исследований использовалась рожь с содержанием спорыньи 1%, средняя плотность зерновок ржи и рожков спорыньи составляла $1,215 \text{ г/см}^3$ и $1,077 \text{ г/см}^3$ соответственно. Влажность зерновой массы равнялась 14,5%.

Результаты и обсуждение

Одной из причин направленного в среднем движения по наклонной поверхности при вибрациях является асимметрия возбуждения за счёт наклона плоскости колебаний. При этом сила трения в случае положительного направления горизонтальной проекции силы инерции в переносном движении (движущая сила) уменьшается в результате уменьшения нормального давления. При противоположном направлении этой проекции сила трения соответственно увеличивается.

В процессе вибропневмосепарирования перемещение зерновой массы по сетчатой деке вибропневмосепаратора (далее ВПС), совершающего поступательные колебания, направление которых образует с этой поверхностью угол β , происходит за счёт действия добавочной силы, роль которой выполняет сила инерции в переносном движении, определяемая по формуле:

$$P_{II} = ma_{II} \quad (1)$$

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

Проведённые теоретические исследования позволяют сделать вывод, что наиболее целесообразно для описания поведения зерновой массы на сетчатой деке ВПС использовать метод замены зернового потока отдельной материальной частицей. После получения математической зависимости для отдельной материальной частицы, необходимо на основе дополнительных экспериментальных исследований внести поправочные коэффициенты, позволяющие учесть влияние не учтённых в математической модели факторов.

На рисунке 2 представлена схема сил, действующих на материальную частицу, находящуюся на сетчатой деке ВПС.

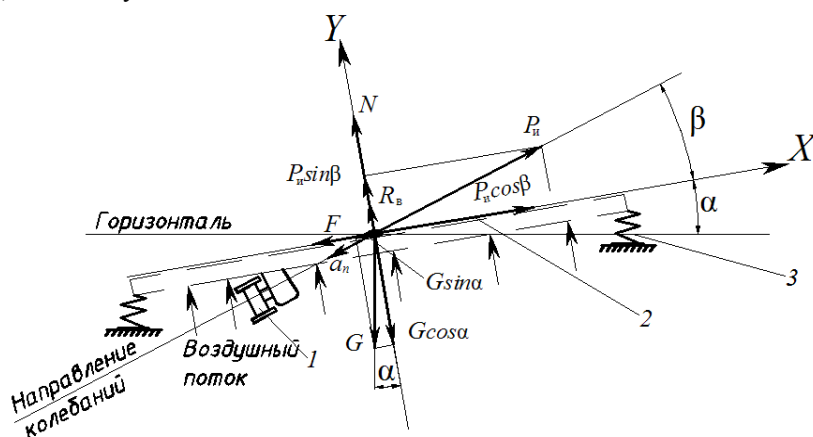


Рис. 2. Схема сил при вибрационном перемещении частицы в случае наклонных гармонических колебаний:

— Processes and Equipment of Food Productions —

1 – электровибратор; 2 – сетчатая дека; 3 – виброопоры

На частицу действуют следующие силы:

- сила тяжести частицы – $G = mg$;
- полная реакция деки, отклонённая от нормали к её поверхности на угол трения – N ;
- сила инерции в переносном движении – P_{II} ;
- реакция восходящего воздушного потока – $P_{\text{в}}$, действующая нормально к поверхности деки.

Учитывая, что дека ВПС совершает поступательные периодические колебания, подчиняющиеся гармоническому закону, P_{II} определяется по формуле:

$$P_{II} = mA\omega^2 \sin(\omega \cdot t + \varphi), \quad (2)$$

где A – 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:

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

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

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

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

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

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

— Процеси та обладнання харчових виробництв —

$$mg \cos \alpha - mA\omega^2 \sin \alpha \sin \beta - R_B > 0, \quad (6)$$

После элементарных преобразований получаем:

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

Для определения реакции восходящего воздушного потока на частицу автором [1] предлагается использовать формулу Ньютона:

$$R_B = k_\beta \rho_B F_M (v_1 - v_2)^2 \quad (8)$$

где k_β – коэффициент сопротивления; ρ_B – плотность воздуха, кг/м³; F_M – миделево сечение, м²; v_1 – скорость воздушного потока, м/с; v_2 – скорость частицы, м/с.

В источнике [Процессы и аппараты пищевых производств: Учебн. для вузов. Под ред. А.Н. Острикова. – кн.1. – СПб.: ГИОРД, 2007. – 704с.] вводится понятие «скорость витания частицы в стеснённых условиях». Тогда формула (8) приводится к виду:

$$R_B = mg \frac{(v_1 - v_2)^2}{C_s^2} \quad (9)$$

где C_s – скорость витания частицы в стеснённых условиях.

Данная скорость определяется по формуле:

$$C_s = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{gd_3(\rho_q - \rho_B)^2}{\rho_B k_\beta}}, \quad (10)$$

где d_3 – эквивалентный диаметр частицы, м; ρ_q – плотность частицы, кг/м³; ρ_B – плотность воздуха, кг/м³; k_β – коэффициент сопротивления.

Тогда неравенство (7) можно записать в виде:

$$\frac{4d_3(\rho_q - \rho_B)^2(g \cos \alpha - A\omega^2 \sin \beta)}{3\rho_B k_\beta (v_1 - v_2)^2} > 1, \quad (11)$$

Таким образом, при условии выполнения неравенства (11) частица перемещается по сетчатой деке безотрывно.

Для решения системы уравнений (4) необходимо подставить в верхнее уравнение системы нормальную реакцию N определяемую по уравнению (5). Тогда верхнее уравнение системы (4) примет вид:

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

— **Processes and Equipment of Food Productions** —

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

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

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

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

Средняя скорость частицы рассматривается как сумма перемещений частицы вверх и вниз за один период колебаний отнесённая ко времени данных перемещений и определяется по формуле:

$$v_{\text{ср}} = \frac{S_B + S_H}{T_0} = \frac{n}{60} (S_B + S_H), \quad (15)$$

где S_B – 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.

При решении систем уравнений, подобных системе (3), Гортинским В.В. была определена средняя скорость частицы, находящейся на наклонной поверхности, совершающей гармонические колебания:

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

где z – коэффициент, определяемый по формуле:

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

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

Коэффициент ε , определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\delta_{2+} - \delta_{1+}}{2}, \quad (18)$$

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

— Процеси та обладнання харчових виробництв —

В данном случае δ_{1+} это фазовый угол, при котором начинается относительное скольжение частицы в положительном направлении ($\frac{d_2x}{dt^2} \geq 0$) а δ_{2+} – фазовый угол, при котором движение в положительном направлении заканчивается.

Выражение (16) не учитывает влияние восходящих воздушных потоков и взаимодействие с конструктивными элементами вибропневмосепаратора, поэтому теоретическая скорость, определяемая по выражению (16) не соответствует действительной скорости перемещения частицы по сетчатой деке разработанного ВПС. С практической точки зрения наибольший интерес представляет определение теоретической производительности ВПС, как одного из показателей эффективности его работы.

Исходя из условия неразрывности зернового потока, среднюю скорость перемещения зерновой массы по сетчатой деке можно определить по формуле:

$$v_{cp} = \frac{Q}{B \cdot h_{дин} \cdot \rho_n}, \quad (19)$$

где v_{cp} – средняя скорость перемещения зерновой массы по сетчатой деке, м/с; Q – нагрузка на рабочий орган (деку), кг/с; B – ширина канала, м; ρ_n – насыпная плотность зерновой массы, кг/м³; $h_{дин}$ – высота слоя в динамике, м.

При работе ВПС нагрузка на сетчатую деку равна производительности, т.к. в процессе сепарирования высота слоя продукта на сетчатой деке остаётся постоянной. Под шириной канала B следует понимать ширину выходного патрубка ВПС. Высота слоя в динамике $h_{дин}$, учитывая конструктивные особенности, равняется высоте выходного патрубка ВПС. Тогда формулу (19) относительно удельной производительности можно записать в виде:

$$Q = 36 \cdot v_{cp} \cdot \rho_n \cdot h \quad (20)$$

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

Тогда, принимая с учётом поправочных коэффициентов среднюю скорость перемещения зерновой массы, равную средней скорости отдельной частицы, удельная теоретическая производительность ВПС определяется по формуле:

$$Q = 36 \cdot k \cdot \rho_n \cdot h \cdot \left[A \omega \cos \beta \cos \varepsilon \sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon z}{\sin \varepsilon} \right)^2} \left[\frac{2}{\pi} f t g \beta \left(t g \varepsilon - \varepsilon + \frac{\pi}{2} \right) - 1 \right] \right], \quad (21)$$

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

Данный коэффициент был определён экспериментально:

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

— Processes and Equipment of Food Productions —

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

На рисунке 3 представлена графическая зависимость удельной производительности ВПС от коэффициента очистки.

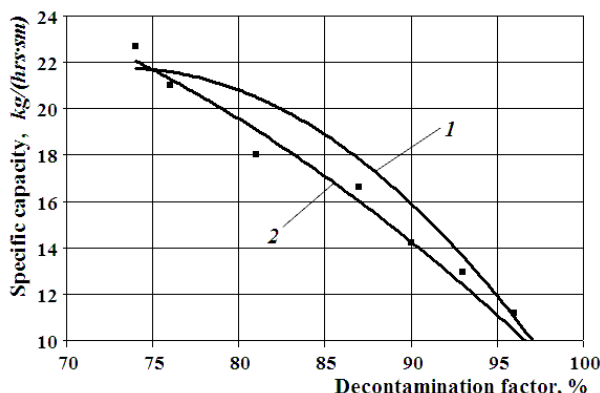


Рис. 3. Зависимость удельной производительности ВПС от коэффициента очистки
1 – расчётная, 2 - экспериментальная

Результаты экспериментальных исследований подтверждают полученные расчетным путем. Сравнение практических результатов и расчетных по определению удельной производительности ВПС показывает, что расхождение в результатах не превышает 5%.

Анализируя выражение (21) можно сделать вывод, что в явном виде производительность ВПС зависит только от амплитуды колебаний сетчатой деки. Анализ же влияния других режимно-конструктивных факторов требует дополнительных экспериментальных исследований.

Выводы

Разработан экспериментальный стенд для изучения процессов сортирования зерновой массы по удельной плотности в псевдооживленном слое. На разработанном стенде получены данные, позволяющие подтвердить адекватность полученных математических моделей.

Определены условия возникновения перемещения частицы по сетчатой деке вибропневмосепаратора в зависимости от силового воздействия на отдельную частицу.

Разработана математическая модель, описывающая изменение производительности вибропневмосепаратора для разделения сыпучих продуктов в зависимости от амплитуды, частоты и направления колебаний сетчатой деки, ее угла наклона и давления в рабочей камере разработанного вибропневмосепаратора.

Литература

1. Marian Panasiewicz, Paweł Sobczak, Jacek Mazur, Kazimierz Zawiślak, Dariusz Andrejko. The technique and analysis of the process of separation and cleaning grain materials / *Journal of Food Engineering*, Volume 109, Issue 3, 2012, Pp. 603-608.
2. Cleaning and sorting particulate food, e.g. cereal grains, beans, etc. — using optical detector to determine colour, size and/or shape of particles and classify them into acceptable and non-acceptable food particles or impurities / *Food Control*, Volume 10, Issue 1, February 1999, P. 56
3. Prabir Dasgupta, Priyanka Manna. Geometrical mechanism of inverse grading in grain-flow deposits: An experimental revelation / *Earth-Science Reviews*, Volume 104, Issues 1–3, January 2011, Pp. 186-198
4. Tadhg Brosnan, Da-Wen Sun. Inspection and grading of agricultural and food products by computer vision systems / *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 36, Issues 2–3, November 2002, Pp. 193-213
5. Hongchang Li, Yaoming Li, Fang Gao, Zhan Zhao, Lizhang Xu. CFD–DEM simulation of material motion in air-and-screen cleaning device / *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 88, October 2012, Pp. 111-119.
6. Meftah Salem M. Alfatni, Abdul Rashid Mohamed Shariff, Mohd Zaid Abdullah, Mohammad Hamiruce B. Marhaban, Osama M. Ben Saaed. The application of internal grading system technologies for agricultural products / *Journal of Food Engineering*, Volume 116, Issue 3, June 2013, Pp. 703-725.
7. Устройство для разделения сыпучих продуктов по плотности: пат. №11598 Респ. Беларусь, МПК В 07 В 4/08 / А.В.Иванов, В.М. Поздняков; заявитель Могилёвский гос. ун-т продовольствия. - № а20070011; заявл. 10.01.07.; опубл. 28.02.09 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. - №1. - С. 62 – 63.*
8. Устройство для разделения сыпучих продуктов по плотности: пат. №12360 Респ. Беларусь, МПК В 07В 4/00 / А.В.Иванов, В.М. Поздняков; заявитель Могилёвский гос. ун-т продовольствия. - № а20071262; заявл. 17.10.07.; опубл. 30.06.09 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. - №4. - С. 81.*
9. Гортинский, В.В. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях / В.В Гортинский, А.Б. Демский, М.А. Борискин, Москва, «Колос», 1980. – 303с.