

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ВЫДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ПРИ ВИБРОПНЕВМАТИЧЕСКОМ СЕПАРИРОВАНИИ СМЕСИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

К. ЭРДЕС,* Р. БАТМЕНД

Кафедра Сельскохозяйственного Машиноведения, Будапештский Технический
Университет

Поступило 25 сентября 1982 г.
Представлено В. Тхернес

Введение

Для очистки смесей зерна от трудноотделимых примесей в настоящее время наиболее распространены механические методы сепарирования, так как большинство сыпучих материалов отличается по механическим свойствам от их компонентов, поэтому условия разделения физически обеспечены. Сепарирующие машины выпускаются серийно, поэтому их покупка, эксплуатация и ремонт не требует особых расходов от потребителя, эффективность и производительность при этом удовлетворяет современным требованиям. Такими машинами являются вибропневматические сепараторы (МИАГ, СИЙМОН, ГОЛФЕТТО, и т.д.) в которых эффективность вибрационного разделения повышается за счет дополнительного подвода сжатого воздуха для разрыхления слоя сыпучего материала.

Ниже обсуждаются результаты теоретического и экспериментального исследования скорости выделения частиц из слоя сыпучей смеси зерна, загруженного в вибропневматический сепаратор. Сначала излагается детерминистическая математическая модель, описывающая движение материала на рабочем органе машины, после этого анализируется влияние различных факторов на скорость выделения частиц и в заключении даются выводы об адекватности модели путем сравнения расчетных и экспериментальных данных.

1. Математическая модель движения частиц на рабочем органе вибропневматического сепаратора

Процессы, происходящие на рабочем органе вибропневматического сепаратора достаточно сложные с точки зрения теоретического исследования, так как включают в себя с одной стороны равномерное

* Институт Технической Химии АН ВНР, Веспрем

движение потока сыпучей массы зерна и движение в противоположном направлении выделяющихся примесей под действием детерминистических сил, приложенных от колеблющегося рабочего органа, а с другой стороны хаотическое движение отдельных частиц (зерно, камни, и т.д.) в процессе перемешивания, имеющее стохастический характер, особенно в месте подачи основной смеси. Поэтому в первом приближении большинство авторов отстраняется от рассмотрения стохастических явлений и ограничивается изучением движения отдельной и притом идеализированной частицы. Сущность идеализации состоит в том, что частица имеет определенную и постоянную массу « m », правильную (шарообразную) форму, и те же фрикционные и ударные свойства, что и реальные частицы компонентов зерновой смеси. На основе динамического равновесия при движении частицы под действием приложенных к ней детерминистических сил, описываются дифференциальные уравнения движения, которые при заданных начальных и граничных условиях, выражающих реальные условия при соударении решаются в замкнутом виде. В данном случае следуем этой методике, обусловленной тем, что до сих пор пока не имеем данных о возможном движении отдельной частицы, нет смысла приступить к исследованию более сложных процессов, происходящих при движении слоя, а с другой стороны по литературным данным можно убедиться в том, что полученные таким путём результаты в первом приближении достаточны для анализа факторов, влияющих на скорость выделения [1, 2, 3, 4, 5].

Рабочий орган вибропневматического сепаратора представляет собой канал с параллельными стенками и перфорированное для поступления в сепарируемый слой зерновой смеси сжатого воздуха днище, наклоненное к горизонту под углом α . Весь канал смонтирован в раме, которая совершает колебательное движение под действием возбуждающей силы, приложенной к ней под углом β от вибрационного генератора.

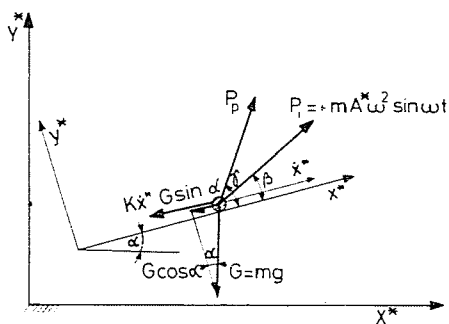


Рис. 1. Силы, действующие на частицу, находящуюся на рабочем органе вибропневматического сепаратора

На частицу, попадающую на плоскую поверхность дна, действуют следующие силы (рис. 1):

$G = mg$ — сила тяжести, N ;

$P_i = mA^*\omega^2 \sin \omega t$ — возбуждающая сила вибрации; N ;

P_p — сила, поднимающая частицу сжатого воздуха; N ;

$K\dot{x}^*$ — сила вязкого трения в направлении x^* ; N ;

$K\dot{y}^*$ — сила вязкого трения в направлении y^* ; N .

При составлении модели движения частицы предполагаем, что выделяемые частицы являются упругими и против их движения действует т. н. вязкое сопротивление, которое создаётся в результате трения и многочисленных микроударов стохастически движущихся в частиц внутри сыпучего слоя; в то же время разрыхляющее действие сжатого воздуха создаёт условия для виброударного движения отдельных частиц при выделении (частицы движутся по плоскости с микропрыжками).

Дифференциальные уравнения движения будут следующие:

$$m\ddot{x} + K\dot{x}^* = mA^*\omega^2 \sin(\omega t + \varphi) \cos \beta - mg \sin \alpha + P_p \cos \gamma \quad (1)$$

$$m\ddot{y}^* + K\dot{y}^* = mA^*\omega^2 \sin(\omega t + \varphi) \sin \beta - mg \cos \alpha + P_p \sin \gamma \quad (2)$$

Используя следующие замены дифференциальные уравнения перепишем в безразмерную форму:

$$\left. \begin{aligned} \tau = \omega t, \quad x = x^* \frac{\omega^2}{g}, \quad y = y^* \frac{\omega^2}{g}, \quad k = \frac{K}{m\omega}, \\ \dot{x} = \dot{x}^* \frac{\omega}{g}, \quad \dot{y} = \dot{y}^* \frac{\omega}{g}, \quad A = A^* \frac{\omega^2}{g}, \\ \ddot{x} = \ddot{x}^*/g, \quad \ddot{y} = \ddot{y}^*/g, \quad p = \frac{P_p}{mg}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Безразмерные дифференциальные уравнения имеют следующий вид:

$$\ddot{x} + k\dot{x} = A \cos \beta \sin(\tau + \varphi) - (\sin \alpha - p \cos \gamma) \quad (4)$$

$$\ddot{y} + k\dot{y} = A \sin \beta \sin(\tau + \varphi) - (\cos \alpha - p \sin \gamma) \quad (5)$$

Общее решение дифференциальных уравнений имеет вид:

$$x = C_1 e^{-k\tau} + C_2 - \frac{A \cos \beta}{1+k^2} [k \cos(\tau + \varphi) + \sin(\tau + \varphi)] - \frac{(\sin \alpha - p \cos \gamma)}{k} \tau \quad (6)$$

$$y = C_3 e^{-k\tau} + C_4 - \frac{A \sin \beta}{1+k^2} [k \cos(\tau + \varphi) + \sin(\tau + \varphi)] - \frac{(\cos \alpha - p \sin \gamma)}{k} \tau \quad (7)$$

$$\dot{x} = -kC_1 e^{-k\tau} - \frac{A \cos \beta}{1+k^2} [\cos(\tau + \varphi) - k \sin(\tau + \varphi)] - \frac{(\sin \alpha - p \cos \gamma)}{k} \quad (8)$$

$$\dot{y} = -kC_3 e^{-k\tau} - \frac{A \sin \beta}{1+k^2} [\cos(\tau + \varphi) - k \sin(\tau + \varphi)] - \frac{(\cos \alpha - p \sin \gamma)}{k} \quad (9)$$

$$\ddot{x} = k^2 C_1 e^{-k\tau} - \frac{A \cos \beta}{1+k^2} [\sin(\tau + \varphi) + k \cos(\tau + \varphi)] \quad (10)$$

$$\ddot{y} = k^2 C_3 e^{-k\tau} - \frac{A \sin \beta}{1+k^2} [\sin(\tau + \varphi) + k \cos(\tau + \varphi)] \quad (11)$$

В дальнейшем необходимо определить смещение частицы в одном периоде колебаний в направлении x , для этого и фазу удара φ , для расчёта траектории полёта частицы постоянные интегрирования C_1, C_2, C_3, C_4 и наконец среднюю скорость перемещения частицы \bar{V}^* в направлении x .

Условие подбрасывания частицы выражается следующим неравенством:

$$\frac{(1+R)A^* \omega^2 \sin \beta}{(1-R) \cdot g \cos \alpha} \geq 1 \quad (12)$$

Это условие имеет силу при движении частицы без сопротивления среды и в данном случае служит для сравнения с решением дифференциальных уравнений (1) и (2).

При движении частицы с подбрасыванием возможны многочисленные режимы, но устойчивыми являются обычно лишь регулярные периодические движения, поэтому можно предполагать, что в реальных условиях осуществляются именно они. Отсюда следует, что начальные и граничные условия должны быть заданы в моментах времени $\tau=0$ и $\tau=2\pi n$ ($n=1, 2, 3, \dots$). Условия периодического движения показаны на рис. 2.

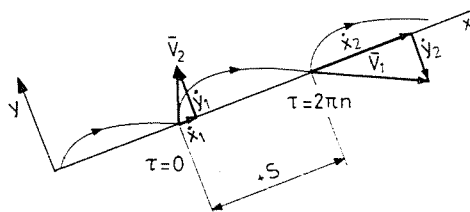


Рис. 2. Схема движения частицы

Удар частицы считается мгновенным, поэтому изменение скорости частицы возникающее вследствие диссипации энергии выражается следующими формулами основанными на гипотезах Ньютона и зависимости вязкого трения:

$$R = \frac{-v_2^n}{v_1^n} = -\frac{\dot{y}_1}{\dot{y}_2} \quad (13)$$

$$1 - \lambda = \frac{v_2^e}{v_1^e} = \frac{\dot{x}_1}{\dot{x}_2} \quad (14)$$

После соответствующего описания и подставления в уравнения (7), (8) и (9) начальных и граничных условий получим следующую систему уравнений:

$$\tau = 0, \quad x = 0, \quad y = 0, \quad \dot{x} = \dot{x}_1, \quad \dot{y} = \dot{y}_1$$

$$0 = C_1 + C_2 - \frac{A \cos \beta}{1+k^2} (k \cos \varphi + \sin \varphi) \quad (15)$$

$$0 = C_3 + C_4 - \frac{A \sin \beta}{1+k^2} (k \cos \varphi + \sin \varphi) \quad (16)$$

$$\dot{x}_1 = -kC_1 - \frac{A \cos \beta}{1+k^2} (\cos \varphi - k \sin \varphi) - \frac{\sin \alpha - p \cos \gamma}{k} \quad (17)$$

$$\dot{y}_1 = -kC_3 - \frac{A \sin \beta}{1+k^2} (\cos \varphi - k \sin \varphi) - \frac{\cos \alpha - p \sin \gamma}{k} \quad (18)$$

$$\tau = 2\pi n, \quad x = s, \quad y = 0, \quad \dot{x} = \dot{x}_2, \quad \dot{y} = \dot{y}_2$$

$$s = C_1 e^{-2\pi nk} + C_2 - \frac{A \cos \beta}{1+k^2} (k \cos \varphi + \sin \varphi) - \frac{(\sin \alpha - p \cos \gamma) 2\pi n}{k} \quad (19)$$

$$0 = C_3 e^{-2\pi nk} + C_4 - \frac{A \sin \beta}{1+k^2} (k \cos \varphi + \sin \varphi) - \frac{(\cos \alpha - p \sin \gamma) 2\pi n}{k} \quad (20)$$

$$\dot{x}_2 = -kC_1 e^{-2\pi nk} - \frac{A \cos \beta}{1+k^2} (\cos \varphi - k \sin \varphi) - \frac{(\sin \alpha - p \cos \gamma)}{k} \quad (21)$$

$$\dot{y}_2 = -kC_3 e^{-2\pi nk} - \frac{A \sin \beta}{1+k^2} (\cos \varphi - k \sin \varphi) - \frac{(\cos \alpha - p \sin \gamma)}{k} \quad (22)$$

Из уравнений (16) и (20) определяем постоянную интегрирования C_3 :

$$C_3 = - \frac{(\cos \alpha - p \sin \gamma) 2\pi n}{k(1 - e^{-2\pi nk})} \quad (23)$$

Вычитая уравнения (18) и (22) и подставляя (23) и (13) определяем значения \dot{y}_1 и \dot{y}_2 :

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 - \dot{y}_2 &= -kC_3(1 - e^{-2\pi nk}) \\ -R\dot{y}_2 - \dot{y}_2 &= -k \frac{(\cos \alpha - p \sin \gamma) 2\pi n(1 - e^{-2\pi nk})}{k(1 - e^{-2\pi nk})} \\ \dot{y}_2 &= - \frac{(\cos \alpha - p \sin \gamma) 2\pi n}{(1 + R)} \end{aligned} \quad (24)$$

$$\dot{y}_1 = \frac{(\cos \alpha - p \sin \gamma) 2\pi n R}{(1 + R)} \quad (25)$$

Преобразуя уравнение (22) к виду

$$\frac{A \sin \beta}{1 + k^2} (\cos \beta - k \sin \varphi) = -\dot{y}_2 - kC_3 e^{-2\pi nk} - \frac{\cos \alpha - p \sin \gamma}{k} \quad (26)$$

и введя обозначения

$$\frac{A \sin \beta}{1 + k^2} = Q, \quad P = \cos \varphi - k \sin \varphi = \frac{\cos(\varphi + \nu)}{\cos \nu}, \quad \nu = \operatorname{arctg} k$$

после соответствующих преобразований получаем уравнение для фазового угла удара в виде:

$$\begin{aligned} \varphi &= \arccos \left\{ \frac{(\cos \alpha - p \sin \gamma) \sqrt{1 + k^2}}{A \sin \beta} \times \right. \\ &\times \left. \left[\frac{2\pi nk(1 + R e^{-2\pi nk}) - (1 + R)(1 - e^{-2\pi nk})}{(1 + R)(1 - e^{-2\pi nk})k} \right] - \operatorname{arctg} k \right\} \end{aligned} \quad (27)$$

Для определения постоянного интегрирования C_1 сначала уравнения (17) и (21) вычитали друг из друга, а потом подставляя уравнение (14) определили значения \dot{x}_1 и \dot{x}_2 :

$$\dot{x}_1 - \dot{x}_2 = -kC_1(1 - e^{-2\pi nk})$$

$$\dot{x}_2(1-\lambda) - \dot{x}_2 = -kC_1(1 - e^{-2\pi nk})$$

$$\dot{x}_2 = \frac{kC_1(1 - e^{-2\pi nk})}{\lambda} \tag{28}$$

$$\dot{x}_1 = \frac{kC_1(1 - e^{-2\pi nk})(1-\lambda)}{\lambda} \tag{29}$$

Подставляя в уравнение (21), полученное из уравнения (28) получили значение C_1 :

$$C_1 = \frac{[-QP \operatorname{ctg} \beta k - (\sin \alpha - p \cos \gamma)]\lambda}{k^2[1 - e^{-2\pi nk}(1-\lambda)]} \tag{30}$$

Перемещение частицы s в направлении x за n периодов колебаний получаем с помощью уравнений (19) и (15) путём подстановки соответствующих значений вычитая их друг из друга:

$$s = \frac{[QP \operatorname{ctg} \beta k + (\sin \alpha - p \cos \gamma)]\lambda(1 - e^{-2\pi nk})}{k^2[e^{-2\pi nk}(1-\lambda) - 1]} - \frac{(\sin \alpha - p \cos \gamma) 2\pi n}{k} \tag{31}$$

Остальные две постоянных интегрирования C_2 и C_4 после необходимых выкладок получили в следующем виде:

$$C_2 = \frac{A \cos \beta}{1+k^2} (k \cos \varphi + \sin \varphi) - C_1 \tag{32}$$

$$C_4 = \frac{A \sin \beta}{1+k^2} (k \cos \varphi + \sin \varphi) - C_3 \tag{33}$$

Наконец среднюю скорость перемещения частицы во время полёта над поверхностью в размерном значении получили в следующем виде:

$$\bar{v}^* = \left(\frac{s}{2\pi n}\right) \cdot \left(\frac{g}{\omega}\right) = \left\{ \frac{[QP \operatorname{ctg} \beta k + (\sin \alpha - p \cos \gamma)]\lambda(1 - e^{-2\pi nk})}{k^2[e^{-2\pi nk}(1-\lambda) - 1]2\pi n} - \frac{\sin \alpha - p \cos \gamma}{k} \right\} \cdot \left(\frac{g}{\omega}\right) \tag{34}$$

Для проверки уравнения (34) определили пределы уравнений (27) и (31) при $k \rightarrow 0$ и получили следующие уравнения (при $p = 0$):

$$\lim_{k \rightarrow 0} \cos \varphi = \frac{\cos \alpha \pi n}{A \sin \beta} \cdot \frac{1-R}{1+R} \quad (35)$$

$$\lim_{k \rightarrow 0} s = A \cos \beta \cdot \cos \varphi \cdot 2\pi n - \sin \alpha \cdot 2\pi n \frac{2-\lambda}{\lambda} \quad (36)$$

Этот же результат получили и решением уравнений (1) и (2) при $K=0$ и $P_p=0$. Кроме того, можно заметить, что преобразованием уравнения (35) к размерному виду получается известное из литературы условие (12), в то же время при $k \neq 0$ и $p \neq 0$ это в соответствии с уравнением (27) получит форму $\cos(\varphi + \nu) \leq 1$, которая выражает нижнюю границу области существования решения. Верхнюю границу области существования можно получить из анализа устойчивости движения, но это выходит за рамки настоящей работы и P_0 связи с этим в дальнейшем ссылаемся на литературу 5.

2. Влияние различных факторов вибропневматического сепарирования на среднюю скорость выделения частиц

А. Влияние кинематических параметров

а) амплитуда колебаний: A^*

Подстановкой в уравнения (34) значение Q формула средней скорости приобретает более простой вид:

$$\bar{V}^* = A^* \omega K_1 \pm K_2 \frac{g}{\omega} \quad (37)$$

Отсюда видно, что увеличение амплитуды внутри области существования приведёт к линейному возрастанию скорости частицы. Это изменение зависит от коэффициента K_1 , который в свою очередь зависит от коэффициента вязкого трения K , от частоты колебаний ω , от углов α и β , от коэффициента псевдооживления p и коэффициента мгновенного трения λ .

б) частота колебаний: ω

Круговая частота колебаний определяется через числа оборотов вращения дебалансов генератора колебаний:

$$\omega = \frac{\pi N}{30} \quad (38)$$

Из уравнения (37) влияние частоты непосредственно нельзя определить, так как коэффициенты K_1 и K_2 также являются функциями ω , поэтому необходимые выводы можно сделать из графического изображения изменения средней скорости в зависимости от частоты.

На рис. 3. изображено это изменение при постоянстве коэффициента кратности подбрасывания $n = 1$. При таком условии скорость частицы уменьшается с увеличением числа оборотов, но в таком случае время периода и траектория полёта частицы тоже должны уменьшаться. Однако в действительности увеличением ω увеличиваем ускорение вибрационного движения, вследствие чего увеличиваются траектория и коэффициент кратности движения n . В этом случае скорость частицы увеличивается по пунктирной линии проведенной на рис. 4. по нижней

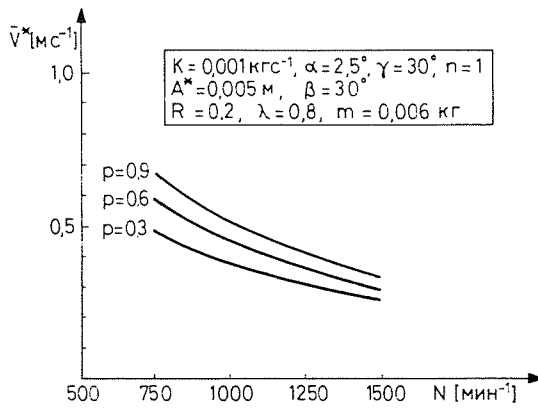


Рис. 3. Скорость выделения частицы в зависимости от числа оборотов

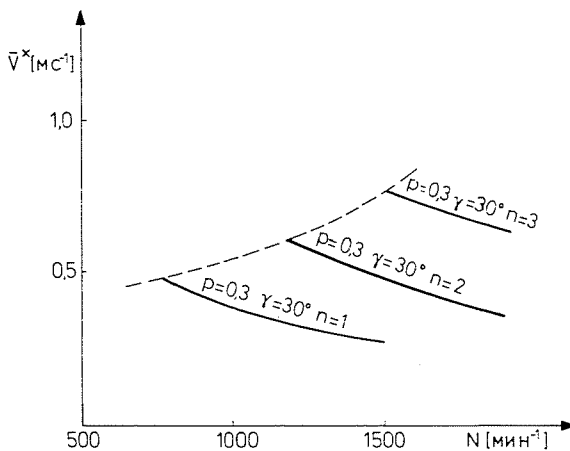


Рис. 4. Влияние изменения кратности периодов на скорость выделения

границе области существования периодического движения. Верхнюю границу, и тем самым зависимость между кратности и числа оборотов, как было отмечено выше, можно определить после анализа устойчивости системы.

Б. Влияние геометрических параметров

а) угол направления возбуждающей силы: β

Из уравнения (34) непосредственно видно, что с увеличением β средняя скорость частицы увеличивается по закону тангенса.

б) угол наклона поверхности дна: α

Влияние угла наклона можно определить по рис. 5. из которого видно, что с увеличением α скорость уменьшается по линейному закону.

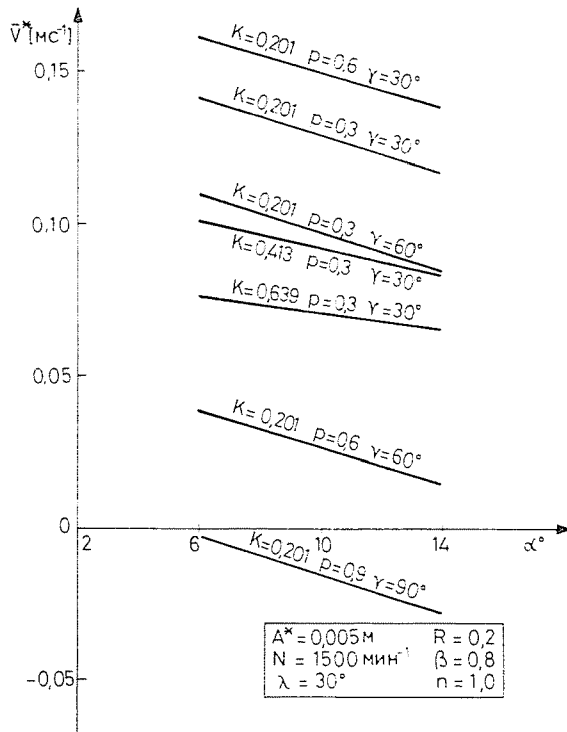


Рис. 5. Изменение скорости выделения в зависимости от угла наклона стола

В. Влияние физических свойств сепарируемых материалов

а) коэффициент вязкого трения: K

Влияние увеличения сопротивления слоя сыпучей массы показано на рис. 6., из которого видно, что с увеличением K скорость \bar{V}^* уменьшается по степенному закону.

б) коэффициент удара: R

Коэффициент удара R содержится в уравнении (34) в выражении P , что означает, что влияние этого коэффициента появляется в изменении φ , фазы удара. Из уравнения (35) видно, что с увеличением R угол фазы удара увеличивается, что влечет за собой увеличение ускорения вибраций, таким образом увеличивается и средняя скорость перемещения частицы.

в) коэффициент мгновенного трения: λ

Из уравнений (34) и (35) можно установить, что увеличение λ приведет к убыванию средней скорости \bar{V}^* .

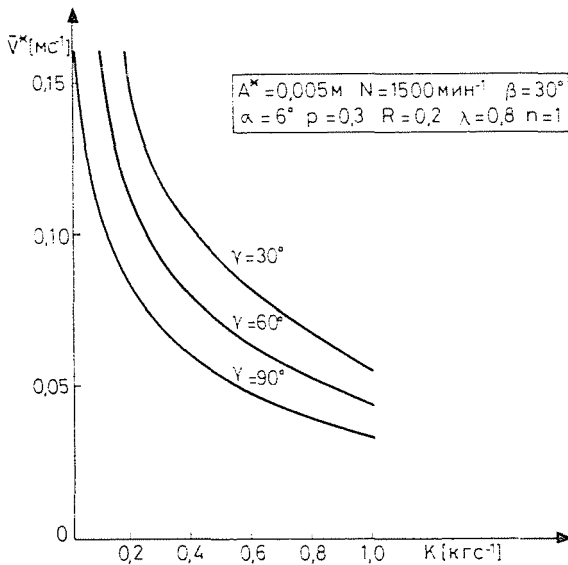


Рис. 6. Влияние сопротивления среды на скорость выделения

Г. Влияние слоя, разрыхленного сжатым воздухом

а) коэффициент псевдооживления: p

Коэффициентом псевдооживления выражается мера псевдооживленности слоя, значение которого $p = 1$, если скорость воздуха равняется скорости начала псевдооживления, когда давление на частицу приблизительно равно её весу. Влияние этого коэффициента видно из рис. 7. Если угол направления ввода воздушного потока равен углу возбуждающей силы, то с увеличением p скорость увеличивается, а когда угол γ превышает это значение, с увеличением p скорость уменьшается.

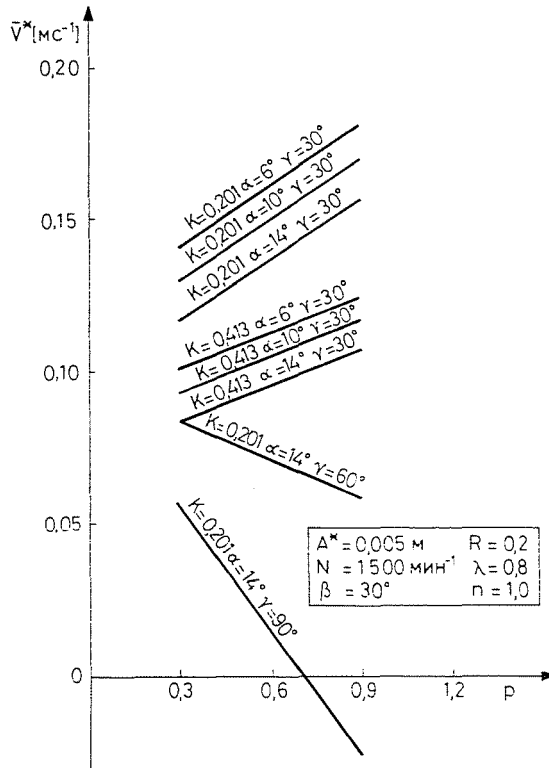


Рис. 7. Влияние коэффициента псевдооживления на скорость выделения

б) угол направления ввода потока воздуха: γ

Из рис. 8. видно, что с увеличением угла γ , \bar{V}^* уменьшается по линейному закону. Это связано с тем, что с увеличением γ траектория полёта уменьшается (рис. 9.) и потенциальная энергия частицы и тем самым её перемещение уменьшаются за один период движения.

3. Экспериментальное исследование скорости выделения частицы

Измерение скорости движения частицы, выделяющейся из равномерно загруженного потока зерновой смеси осуществляли на лабораторной установке разделения типа $LA-K$. Экспериментальное оборудование состояло из следующих основных узлов: вибропневматический стол установки, эксцентриковый механизм возбуждения колебаний, установка подачи материала и вентилятор для подвода воздуха с соответствующим трубопроводом и измерительными приспособлениями давления и расхода воздуха. Схема установки показана на рис. 10.

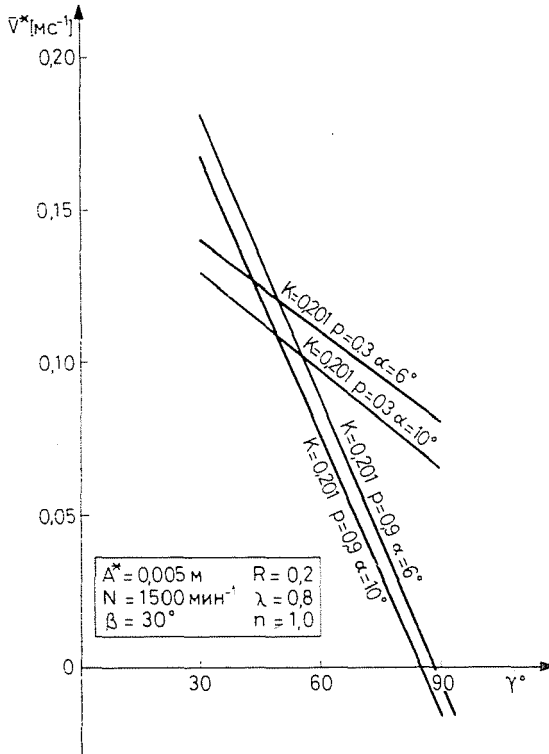


Рис. 8. Влияние направления продувки воздуха на скорость выделения

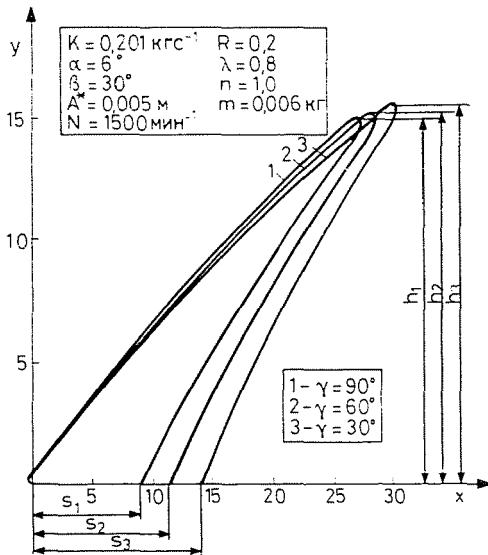


Рис. 9. Траектории полета частицы при различных углах γ

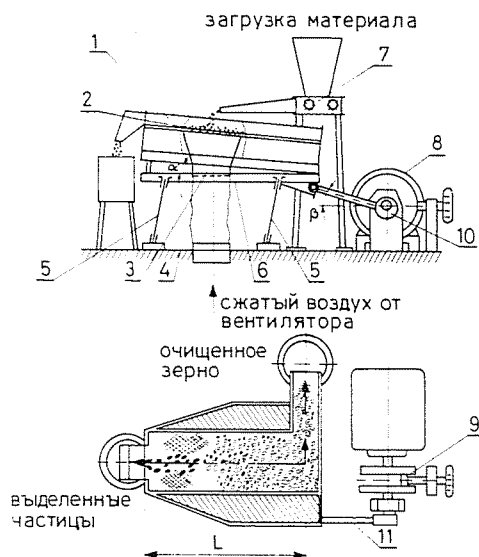


Рис. 10. Схема экспериментального вибропневматического сепарирующего устройства

Вибропневматический стол разделения 1 оснащен перфорированным дном 2 и потрубком для подвода воздуха 3 и смонтирован в раме 6 подвешенной на плоских пружинах 5, прикрепленных в станине машины 4. Угол наклона стола к горизонту можно изменять в пределах $\alpha = 1 \div 7^\circ$. Подачу исходной смеси осуществляли серийным вибрационным загрузочным устройством типа RETSCH 7, который можно регулировать в пределах $q = 0 \div 0,1$ кг/с. Равномерность и точность подачи проверяли контрольным измерением выхода продукта. Составными частями эксцентрикового возбудителя колебаний являются электромотор 8, фрикционная передача 9 для плавного регулирования числа оборотов в пределах $N = 0 \div 550$ мин⁻¹, эксцентер для установления амплитуды для значений $A^* = 1,0 - 3,0 - 5,0 - 7,0$ мм; 10. Угол возбуждающей силы был постоянным $\beta = 30^\circ$, совпадающим с направлением рычага эксцентрикового механизма.

Эксперименты провели в следующем порядке: на специальной установке приготовили исходную смесь (зерно, камни) по заданной концентрации путём смешения и загружали в приёмный патрубок вибрационного загрузочного устройства, которое пустили в ход после установления параметров разделения и включения экспериментальной установки. При установлении процесса разделения в поток зерновой смеси поместили меченные частицы выделяемого материала (крашен-

Таблица 1

№	A^* мм	α град	p —	q кгс ⁻¹	c %	$\bar{V}^*_{изм}$ мс ⁻¹	$\bar{V}^*_{расч}$ мс ⁻¹	K кгс ⁻¹
1	7,0	3,0	2,0	0,02	5,0	0,023	0,024	4,0
2	7,0	4,0	2,0	0,02	5,0	0,020	0,018	5,0
3	7,0	5,0	2,0	0,02	5,0	0,018	0,015	6,0
4	7,0	6,0	2,0	0,02	5,0	0,011	0,012	7,0
5	7,0	7,0	2,0	0,02	5,0	0,006	0,008	10,0
6	7,0	4,0	2,0	0,01	5,0	0,018	0,018	5,0
7	7,0	4,0	2,0	0,01	3,0	0,015	0,018	5,0
8	7,0	4,0	1,2	0,01	3,0	0,002	0,000	5,0
9	5,0	4,0	2,0	0,02	5,0	0,006	0,007	5,0
10	5,0	4,0	2,0	0,01	3,0	0,004	0,004	5,0

ные камни) и на определенном расстоянии L^* измеряли время прохождения пути t_L выделяемых частиц. Среднюю скорость частиц определяли по простой формуле:

$$\bar{V}^* = \frac{L^*}{t_L} \quad (39)$$

В ходе экспериментов наблюдалось эффективное разделение смеси и виброударное движение выделенных частиц, то есть режим движения с подбрасыванием. Кроме параметров вибрации изменяли и подачу q и концентрацию исходной смеси c . Степень псевдооживленности определяли по данным экспериментального измерения начала псевдооживления на специальной виброустановке. Остальные физические свойства (R, λ, K) определяли методикой, описанной в литературе 6. Данные экспериментов приведены в таблице № 1.

Выводы

Измеренные значения скорости выделения частиц сопоставили со значениями, рассчитанными по формуле (34). На рис. 11. показано изменение скорости выделения в зависимости от изменения угла наклона рабочего органа экспериментального сепарирующего устройства. По графикам рис. 11. можно установить, что характер изменения скорости совпадает с предсказанным по математической модели, т.е. с увеличением угла наклона стола, скорость частиц убывает. В то же время интенсивность изменения в реальной физической системе больше расчётной (по модели). Из анализа численных значений можно сделать вывод, что между углом наклона α и коэффициентом вязкого трения K

существует корреляционная связь, что обусловлено увеличением плотности слоя и тем самым увеличением сопротивления против движения выделяющихся частиц. Из таблицы № 1. видно, что скорость выделения частиц также уменьшается с уменьшением подачи q и концентрации c . Хотя эти факторы в модели не учтены из вышеотмеченных изменений

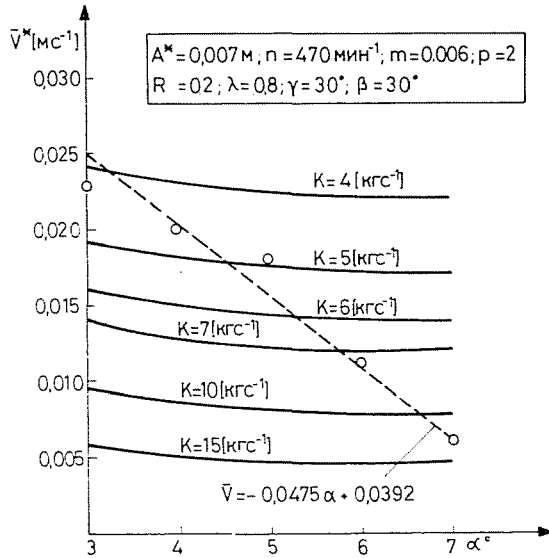


Рис. 11. Измеренные и расчётные значения скорости выделения частицы

тоже следует сделать вывод, что в реальных условиях возникает множество корреляционных взаимосвязей между различными факторами, имеющими влияние на процесс вибропневматического сепарирования, поэтому в дальнейших исследованиях необходимо использовать методы математической статистики.

Обозначения

- A^* — амплитуда колебаний, м;
- A — безразмерная амплитуда;
- C — постоянная интегрирования;
- c — концентрация;
- G — вес частицы, N ;
- g — гравитационное ускорение, мс^{-1} ;
- h — безразмерная высота подбрасывания частицы;

K	— коэффициент вязкого трения, кгс ⁻¹ ;
K_1, K_2	— постоянные;
k	— безразмерный коэффициент вязкого трения;
L^*	— длина пути проходимого частицей при измерении, м;
m	— масса частицы, кг;
N	— число оборотов вращения генератора колебаний, мин ⁻¹ ;
n	— коэффициент кратности подбрасывания;
P_i	— сила возбуждения, N;
P_p	— сила поддуваемого воздуха, N;
p	— коэффициент псевдооживленности;
q	— подача материала, кгс ⁻¹ ;
R	— коэффициент удара;
s	— безразмерное перемещение частицы;
t	— время, с;
\bar{V}^*	— средняя скорость выделения частиц, мс ⁻¹ ;
x^*, y^*	— координаты частицы и их производные, м, мс ⁻¹ , мс ⁻² ;
x, y	— безразмерные координаты и их производные;
α	— угол наклона стола сепаратора, в градусах;
β	— угол направления возбуждения, в градусах;
γ	— угол направления продувки воздуха, в градусах;
λ	— коэффициент мгновенного трения;
τ	— безразмерное время;
φ	— фазовый угол удара;
ω	— круговая частота колебаний.

Индексы

e	— тангенциальное направление;
n	— нормальное направление;
1	— мгновение перед ударом;
2	— мгновение после удара.

Резюме

В технологии очистки зерна для выделения трудноотделимых примесей (например камни одинаковые по размеру с семенами зерна) широко используются так называемые вибропневматические сепараторы. В настоящем сообщении приведены результаты теоретического и экспериментального исследования скорости выделения частиц, определяющей эффективность вибропневматического сепарирования. Сравнением расчётных и экспериментальных данных установлено, что разработанная авторами детерминистическая математическая модель с качественной точки зрения удовлетворительно описы-

вает систему в исследуемой области параметров. Причиной количественных расхождений является корреляционная связь между параметрами сепарирования и некоторыми меняющимися в процессе сепарирования физическими свойствами сыпучей массы зерна. Отсюда сделан вывод, что при дальнейшем исследовании процесса необходимо применять методы математической статистики.

Литература

1. БЛЕХМАН, И. И.—ДЖАНЕЛИДЗЕ, Г. Ю.: Вибрационное перемещение. Москва, Наука 1964.
2. ГОРТИНСКИЙ, В. В.—ДЕМСКИЙ, А. В.—БОРИСКИН, М. А.: Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях, Москва, Колос, 1980
3. ВЕМЕЙЕР, К. Х.: Фердерн унд Хебен, 5, 1961.
4. НАГАЕВ, Р. Ф.: Периодические режимы вибрационного перемещения, Москва, Наука, 1978.
5. КОБРИНСКИЙ, А. Е.—КОБРИНСКИЙ, А. А.: Виброударные системы, Москва, 1973.
6. ЭРДЕС, К.: Автореферат кандидатской диссертации, Москва, 1978.

Károly ERDÉSZ Veszprémi Vegyipari Egyetem H-8200 Veszprém
Ренценгин Батменд Кафедра Сельскохозяйственного Машиноведения