

УДК 621.6-5

Профессор Е.В. Семенов, профессор А.А. Славянский

(Москов. гос. ун-т технол. и управл. им. К.Г. Разумовского (ПКУ)) кафедра «Технологии продуктов из растительного сырья и парфюмерно-косметических изделий»;

тел. (495) 670 15 10

E-mail: mgutu-sahar@mail.ru

профессор С.Т. Антипов

(Воронеж. гос. ун-т инж. технол.) кафедра машин и аппаратов пищевых производств;

тел. (473) 255 37 16

E-mail: ast@vsuet.ru

Professor E.V. Semenov, professor A.A. Slayanskiy

(K.G. Razumovsky Moscow State University of technol. and manag.) Department of «Technologies of products from vegetable raw materials and prafyumerno-cosmetic products»;

phone (495) 670 15 10

E-mail: mgutu-sahar@mail.ru

professor S.T. Antipov

(Voronezh State University of Engineering Technologies) Department of the machine and devices of food productions

phone (473) 255 37 16

E-mail: ast@vsuet.ru

Расчет эффективности процесса фракционирования сыпучей смеси в рабочем объеме пневмосепаратора

Calculation of efficiency of process of fractionation of loose mix in the working volume of a pneumatic separator

Реферат. Процесс сепарирования сыпучих смесей в воздушном потоке широко распространен в производстве, связанном с очисткой зерна от примесей. При этом для того чтобы эффективно использовать силу тяжести, целесообразно проводить очистку зерна в вертикальном воздушном потоке. Количественный анализ процесса сепарирования рассматривают на базе модели движения изолированной частицы в потоке. Используется закон сохранения импульса в форме второго закона Ньютона. Движение частиц в воздушном потоке развивается в условиях большого значения числа Рейнольдса. Поэтому силу сопротивления движению частицы выбирают по квадратической зависимости от ее относительной скорости. При решении кинетических уравнений в аналитической форме получены зависимости по проекциям координат и скорости движения частицы. На базе количественного анализа уравнения движения частицы, перемещающейся по определенной траектории, определяют критический диаметр частицы. В качестве параметра управления процесса выбирают скорость воздушного потока. На основе заданного дисперсионного состава сыпучей смеси рассчитывают коэффициент осветления. На конкретном примере оборудования, на базе геометрических и физико-механических параметров процесса, в графическом виде приводятся результаты количественного и содержательного анализа по траекториям и скоростям частиц, критическому диаметру частиц, коэффициенту осветления.

Summary. The process of separation bulk mixtures in the air stream is widespread in production associated with the cleaning of grain from impurity. In doing so, in order to effectively use the force of gravity appropriate cleaning grain in vertical air stream. Quantitative analysis of the separation process considering based on the model of the motion of an isolated particles in the stream. We used law of conservation of impulse in the form of the second law of Newton. Movement of particles in the air stream develops in conditions of large of number Reynolds. Therefore, the resistance force particles chosen by quadratic depending on its relative speed. Based on the quantitative analysis of the equations of motion of a particle moving on a specific trajectory, determine the critical diameter of the particles. As a process control setting chosen by the speed of the airflow. Based on the dispersion factor mixture of granular calculated coefficient of lightening. A specific example of equipment based on geometrical and physical-mechanical parameters of the process graphically presents the results of a qualitative and meaningful analysis on trajectories and velocities of the particles, the critical diameter of particle, coefficient of lightening.

Ключевые слова: воздушный поток, поле силы тяжести, пневмосепаратор, коллектив частиц, классифицирование.

Keywords: air flow, gravity field, pneumatic separation plant, collective particles, classification.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

В перерабатывающих производствах АПК и других смежных отраслях промышленности во многих случаях необходимо использовать в технологическом потоке сырьевые ресурсы, полуфабрикаты и др. измельченные материалы определенной крупности.

Для реализации этой цели, например, в условиях обработки зерновой смеси используется способ сепарирования в вертикальном воздушном потоке, что объясняется конструктивной простотой и компактностью применяемого обрабатывающего устройства. Данный способ используют в современных зерновых сепараторах, пневмосепараторах и аспираторах как отечественного, так и зарубежного производства.

При этом следует отметить, что если в смежных областях технологии измельчения и сепарирования материалов, очистки газов и др. отмечаются значительные достижения, то в области развития теории данных процессов успехов меньше. Так, например, если задача о кинетике взвеси в восходящем воздушном потоке и считается наименее сложной среди подобных задач, она все еще мало изучена как в теоретическом, так и в экспериментальном отношении. В то же время данная задача представляет значительный самостоятельный интерес для технических приложений, в том числе, и при решении проблемы фракционирования зерновых смесей на базе пневмосепаратора.

Нужно добавить также, что существующие проблемы механического фракционирования порошкообразных субстанций обусловлены в значительной степени отсутствием системных аналитических разработок по обоснованию режимных параметров работы оборудования. В связи с чем, возникает потребность в углубленном и приближенном к реальному физико-математическому описанию протекания процесса фракционирования измельченных смесей в обрабатывающем оборудовании [1-6].

Очевидно, что для реализации процесса разделения на фракции порошкообразной субстанции, с тем, чтобы после ее обработки получить фракцию из частиц требуемого размера, необходимо, с одной стороны, располагать данными по гранулометрическому составу порошка, с другой стороны, иметь обоснованную методику количественной оценки статистических характеристик взвеси при ее фракционировании по этапам процесса.

Ниже исследуется процесс разделения сыпучей смеси в рабочем объеме пневмосепарующей установки.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При обосновании силового воздействия потока воздуха на частицу (т.е. решая внешнюю задачу аэродинамики) полагают, что действующие на частицу, мало отличающуюся по форме от сферической, силовые факторы выбираются такими же, какими они были бы при решении внутренней задачи аэродинамики однородного потока газа в том месте, где находится частица (рисунок 1).

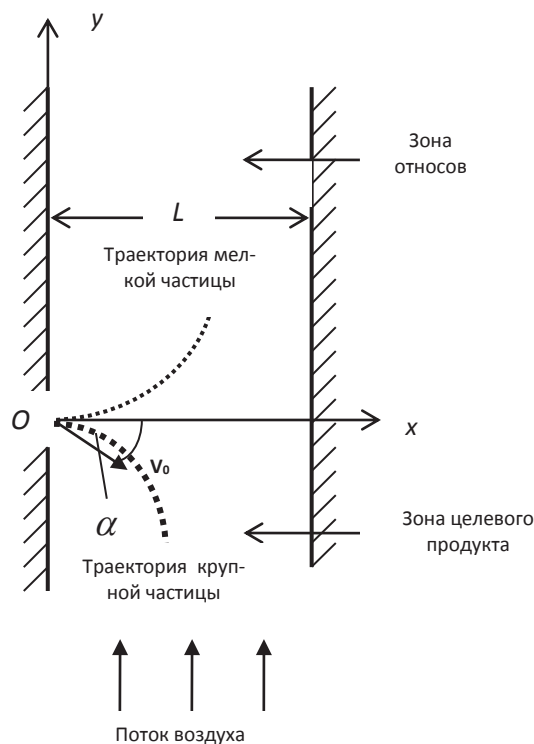


Рисунок 1. Схема траекторий частиц в восходящем воздушном потоке в вертикальном канале пневмосепаратора

При этом учитывают, что на изолированную частицу весом G , введенную каким-либо образом в невозмущенный поток, и движущуюся со скоростью V , со стороны окружающей среды гипотетически действуют: сила сопротивления среды F_c , сила давления, подъемная сила Магнуса-Жуковского и др.

В таком случае, если среди действующих на частицу сил сохранить лишь наибольшие по порядку величины – вес G и силу сопротивления F_c (рисунок 2), то в результате согласно основному закону динамики для точки записывают уравнение:

$$m dV/dt = G + F_c, \quad (1)$$

где m – масса частицы, кг; t – время, с; $G = \{0, -mg\}$ – вектор силы тяжести, F_c – сила сопротивления, Н; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; δ – диаметр частицы, м; μ – ди-

наимический коэффициент вязкости, Па·с;
 $\mathbf{V} = \{V_x, V_y\}$ – вектор скорости частицы,
 $\mathbf{U} = \{0, U\}$, U – скорость потока воздуха, $U > 0$, м/с.

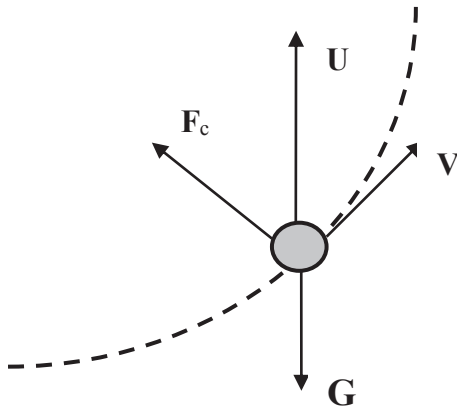


Рисунок 2. Схема к расчету сил, действующих на частицу

Если процесс сепарирования смеси развивается в условиях, когда размер сепарируемых частиц имеет величину порядка нескольких миллиметров, при скорости потока воздуха порядка нескольких метров в секунду, то кинетика частицы в рабочем объеме воздушного сепаратора протекает при немалом значении числа Рейнольдса. Поэтому в качестве формулы расчета силы сопротивления $\mathbf{F}_c$ движению частицы со стороны потока воздуха выбирают квадратическую зависимость по местной (относительной) скорости частицы в потоке (скорости витания).

В таком случае имеют:

$$\mathbf{F}_c = -k_1 \mathbf{V}_{отн} |\mathbf{V}_{отн}|, \quad (2)$$

где $k_1 = 0,5\rho_b C_D S$ – коэффициент пропорциональности, ρ_b – плотность воздуха, кг/м³; C_D – аэродинамический коэффициент сопротивления; S – площадь проекции частицы на плоскость, нормальную направлению ее движения, м²; $\mathbf{V}_{отн} = \mathbf{W} = \mathbf{V} - \mathbf{U}$ – вектор местной скорости частицы (скорости витания), м/с.

При исследовании поставленной задачи оси координат выбирают естественным путем (рисунок 1), направляя ось y вверх, против силы тяжести, а ось x перпендикулярно оси y .

Тогда в соответствии с (2) векторное уравнение (1) в проекциях по осям x и y принимает вид:

$$dV_x/dt = -kV_x |\mathbf{W}|, \quad (3)$$

$$dV_y/dt = -g - k(V_y - U) |\mathbf{W}|, \quad (4)$$

где $k = k_1/m$, $m = \rho_1 \pi \delta^3/6$, ρ_1 – плотность частицы, кг/м³.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Поскольку $|\mathbf{W}| = [V_x^2 + (V_y - U)^2]^{1/2}$, то согласно уравнениям (3), (4) имеют:

$$dV_x/dt = -kV_x[V_x^2 + (V_y - U)^2]^{1/2}, \quad (5)$$

$$dV_y/dt = -g - k(V_y - U)[V_x^2 + (V_y - U)^2]^{1/2}. \quad (6)$$

Решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений (5), (6) согласуют с начальными условиями (рисунок 1):

$$V_x = V_0 \cos \alpha, \quad (7)$$

$$V_y = V_0 \sin \alpha \quad \text{при } t = 0, \quad (8)$$

где V_0 – скорость частицы в точке O (рисунок 1).

Поскольку система уравнений (5), (6) не интегрируется по V_x и V_y в явном виде, то ее решение может быть найдено лишь численным путем.

Для того чтобы получить зависимости, позволяющие прогнозировать результаты разделения смеси в вертикальном пневмосепарирующем канале, желательно располагать аналитическим, пусть даже упрощенным, решением задачи (5) – (8) по проекциям скорости частицы и ее координатам.

На базе численного моделирования задачи Коши (5) – (8), в области реальных значений параметров процесса выявлено, что обычно выполняется неравенство $V_x^2 < (V_y - U)^2$. Поэтому, имея в виду, что $V_x > 0$, $V_y - U < 0$, вместо уравнений (5), (6) приближенно имеют:

$$dV_x/dt = kV_x W, \quad (9)$$

$$dW/dt = -g + kW^2. \quad (10)$$

При этом начальные условия (7), (8) по проекциям скорости частицы принимают вид

$$V_x = V_{x0} = V_0 \cos \alpha, \quad (11)$$

$$W = W_0 \quad \text{при } t = 0, \quad (12)$$

где обозначено $W_0 = V_0 \sin \alpha - U$.

Частным решением дифференциального уравнения (10), согласующимся с (12), служит:

$$W = \varphi(t),$$

где

$$\varphi(t) = \frac{[A \exp(-Bt) - 1] \sqrt{g/k}}{A \exp(-Bt) + 1}, \quad (13)$$

$$A = \frac{\sqrt{g} + \sqrt{k}W_0}{\sqrt{g} - \sqrt{k}W_0}, \quad B = \sqrt{kg} \quad (14)$$

или, если возвратиться к проекции скорости V_y

$$V_y = U + \varphi(t), \quad (15)$$

где $\varphi(t)$ определяют по (13).

$$F(\delta) = \frac{n(\delta \leq \delta')}{n_0}, \quad (25)$$

где $n(\delta \leq \delta')$ – количество частиц размером меньше δ' в определенном объеме, n_0 – количество частиц всех размеров в том же объеме.

Ставили задачу: определить относительное содержание частиц в смеси по целевому продукту и отходам для частиц размером $\delta \in [\delta_1, \delta_2]$, $\delta_1 < \delta_2$.

Данную задачу решали на базе значения коэффициентов уноса ε и осветления η :

$$\varepsilon = \frac{1}{h} \int_0^h F(\delta_k(z)) dz, \quad (26)$$

где ε связано с η соотношением $\varepsilon + \eta = 1$, $F(\delta)$ задают по (25), $\delta = \delta_k(z)$ определяют исходя из (24).

ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Полагали, что полидисперсная взвесь из частиц целевого продукта и примесей той же плотности характеризуется счетной функцией распределения кусочно-линейного вида:

$$F_0(\delta) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq \delta \leq \delta_1, \\ (\delta - \delta_1)/(\delta_2 - \delta_1) & \text{при } \delta_1 < \delta < \delta_2, \\ 1 & \text{при } \delta \geq \delta_2, \end{cases} \quad (27)$$

где, $\delta_1 = 1$ мм, $\delta_2 = 5$ мм – соответственно, минимальный и максимальный диаметр частиц во взвеси.

И пусть требуется определить относительное содержание примесей в данной субстанции после обработки ее на базе заданного параметра управления процесса.

Эту задачу решали, рассчитывая коэффициент уноса ε (26) по параметру управления U – скорости подачи воздуха в рабочий объем установки.

В качестве параметров задачи принимали: ширина канала – $L = 0.05, 0.075, 0.11$ м; угол наклона питающего канала к горизонтальной оси $\alpha = -\pi/4$; скорость подачи частиц из питающего канала $V_0 = 0.5$ м/с; плотность воздуха и твердых частиц, соответственно, $\rho = 1.3$ и $\rho_1 = 1200$ кг/м³; динамическая вязкость воздуха $\mu = 18 \cdot 10^{-6}$ Па·с; коэффициент сопротивления $C_D \approx 1$ [8], скорость подачи воздуха в рабочий объем варьировали в области значений $U \in [3, 8]$ м/с.

Полагая ширину канала $L = 0.1$ м (рисунок 1), на основе численного эксперимента по выбранным значениям параметров задачи и формулы (23), для варьируемых значений скорости U подачи воздуха получили время достижения частицами вертикальной стенки порядка 0.5 с.

Из визуализации представленных на рисунке 4 траекторий частиц, естественным образом, вытекает кинематика частиц: мелкая фаза взвеси отводится в зону отходов, крупная – в зону целевого продукта. В то же время частицы диаметром $\delta = 5 \cdot 10^{-3}$ м при скорости потока воздуха $U = 8$ м/с движутся примерно по критической траектории.

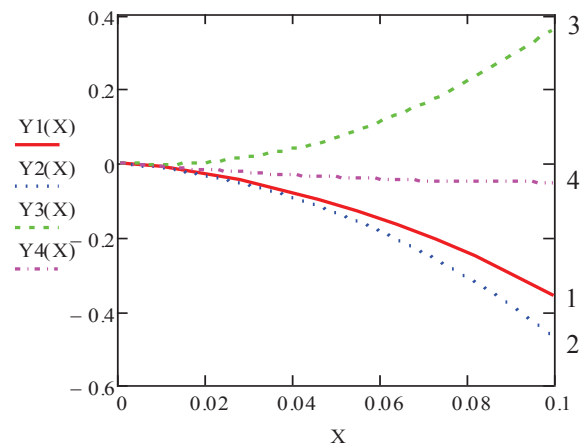


Рисунок 4. Траектории частиц в восходящем воздушном потоке (X, Y – в метрах) ($V_0 = 0.5$ м/с; $U = 3$ м/с; 1 – $\delta = 2.5 \cdot 10^{-3}$, 2 – $\delta = 5 \cdot 10^{-3}$ м; 3 – $U = 8$ м/с; $\delta = 2.5 \cdot 10^{-3}$, 4 – $\delta = 5 \cdot 10^{-3}$ м)

Из данных рисунка 5 а следует, что мелкие частицы, вследствие их большей относительной парусности по сравнению с крупными, при движении воздушного потока с повышенной скоростью (например, при скорости $U = 8$ м/с) в горизонтальном направлении тормозятся сильнее, чем частицы крупной взвеси (кривые 1 и 2). В свою очередь, частицы одного размера также тормозятся быстрее из-за увеличения силы сопротивления воздушного потока, когда скорость потока возрастает (кривые 1 и 3).

Аналогично, в соответствии с данными рисунка 5 б, частицы меньшего размера увлекаются воздушным потоком в вертикальном направлении сильнее, чем крупные частицы (кривая 1 расположена выше кривой 2). При этом, естественно, повышение скорости воздушного потока приводит к увеличению скорости частиц смеси в вертикальном направлении (кривые 3,4 выше кривых 1, 2).

Таким же образом, согласно данным рисунка 5 в, ведут себя и частицы по скорости их витания, получающихся расчетным путем на этом рисунке сдвигом графиков кривых вниз на величину U скорости воздушного потока.

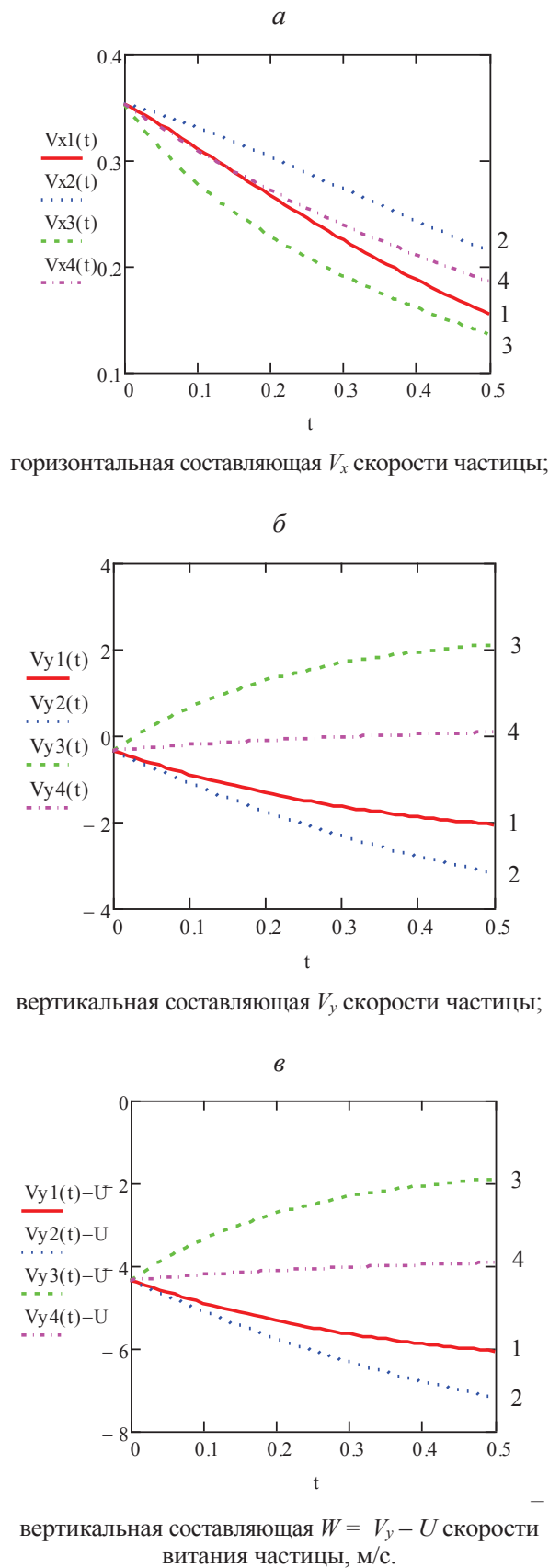


Рисунок 5. Зависимости составляющих скорости (м/с) частицы от времени t (с) ее движения в восходящем воздушном потоке ($V_0 = 0.5$ м/с; $U = 3$ м/с; 1 - $\delta = 2.5 \cdot 10^{-3}$, 2 - $\delta = 5 \cdot 10^{-3}$ м; 3 - $U = 8$ м/с; $\delta = 2.5 \cdot 10^{-3}$, 4 - $\delta = 5 \cdot 10^{-3}$ м)

Касательно поведения зависимости критического диаметра частиц от скорости U воздушного потока и ширины L рабочего объема при обработке сыпучей смеси в пневмосепараторе (рисунок 6) следует отметить, что данная зависимость также соответствует физическому смыслу анализируемого процесса. Например, в связи с тем, что вместе с ростом ширины канала L значение критического диаметра повышается, то это указывает на ухудшение условий сепарирования смеси.

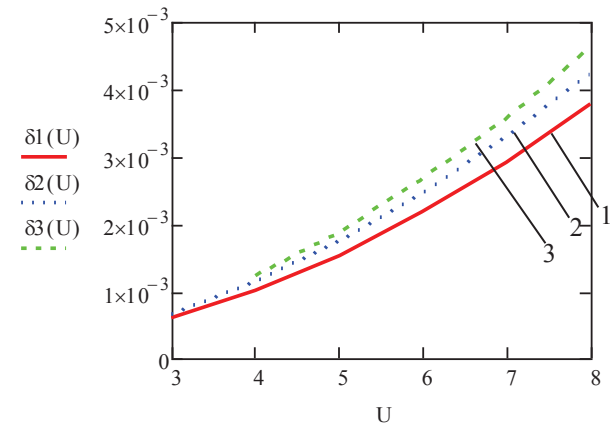


Рисунок 6. Зависимости критического диаметра частиц (м) от скорости U (м/с) воздушного потока и ширины L рабочего объема при обработке сыпучей смеси в пневмосепараторе ($V_0 = 0.5$ м/с; 1 - $L = 0.05$, 2 - $L = 0.075$, 3 - $L = 0.11$ м)

Отправляясь от рассчитанных значений скорости витания W , проводили оценку средней величины числа Рейнольдса для исследуемого процесса по формуле:

$$Re = \frac{W \cdot \delta \cdot \rho}{\mu}. \quad (28)$$

Полагая, например, согласно данным рисунок 5 в, в (28) $W = 4$ м/с, $\delta = 5 \cdot 10^{-3}$ м, получили $Re = 1444$, что лежит в области значений числа Рейнольдса для потока, когда силу сопротивления принимают пропорциональной квадрату местной скорости движущегося тела [8]. Таким образом, выбранный по формуле (2) закон сопротивления согласно (28) обоснован.

Из результатов отраженного графиками рисунок 7 проведенного количественного моделирования на основе зависимости (27) процесса вытекает, что полученные данные расчета также находятся в согласии с физическим смыслом изучаемого явления.

Так, вместе с ростом величины скорости U подачи воздуха отмечается экспоненциальный рост значения коэффициента уноса ε –

удельного содержания мелких частиц в смеси. Что указывает на снижение эффективности процесса отвода мелкой фракции из смеси, когда скорость потока воздуха увеличивается.

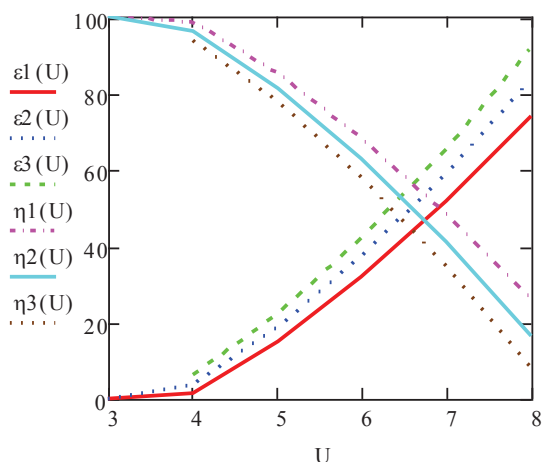


Рисунок 7. Зависимости (в %) коэффициента уноса ε и коэффициента осветления η от скорости U (м/с) воздушного потока и ширины L рабочего объема установки ($V_0 = 0.5$ м/с; 1 - $L = 0.05$, 2 - $L = 0.075$, 3 - $L = 0.11$; 4 - $L = 0.05$, 5 - $L = 0.075$, 6 - $L = 0.11$ м)

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Демский А.Б., Веденев В.Ф. Оборудование для производства муки, крупы и комбикормов (Справочник). М.: ДеЛи принт, 2005. 444 с.
- 2 Бусроуд Р. Течение газа со взвешенными частицами. М.: Мир, 1975. 380 с.
- 3 Коузов П.А., Мальгин А.Д., Скрябин Г.М. Очистка газа и воздуха от пыли в химической промышленности. Л.: Химия, 1982. 320 с.
- 4 Веденев В.Ф., Семенов Е.В., Чернышев Д.Ю. Процесс сепарирования зерна от примесей, отличающихся аэродинамическими свойствами. Теоретические основы пищевых технологий. М.: Издательство «КолосС», 2009. С. 366-395.
- 5 Crouhouish J. Research upon possibility to augment air stream separation ability for cleaning of grainy materials // Sb. Mechan Fak. Visore Sroly Zeme V Praze. 1985. № 1. P. 285-287.
- 6 Clarke B. Cleaning seeds by fluidiration // J. agr. engg Res. 1985. V. 31. № 3. P. 231-242.
- 7 Кудрявцев Е.М. MATCHAD 2000. М.: ДМК Пресс, 2001. 570 с.
- 8 Дейли Дж., Харлеман Д. Механика жидкости и газа. М.: Энергия, 1971. 480 с.
- 9 Карамзин А.В., Семенов Е.В. Количественный анализ процесса фракционирования тонкодисперсных частиц в центробежном сепараторе. // Журнал прикладной химии. 2012. Т. 85. № 10. С.1619-1624.

Дополнительно отметим, что согласно концепции критического диаметра частицы при обработке сепарированием полидисперсной взвеси в зоне отсосов отсутствуют частицы размером больше глобального критического диаметра, тогда как в зоне целевого продукта всегда имеется некоторое количество мелких частиц. Поэтому, в том случае, когда по условиям проведения технологического процесса требуется в наибольшей степени освободить смесь от частиц минимальным размером, то рассмотренную выше процедуру фракционирования повторяют. Для чего рассчитывают коэффициент уноса ε (14) по функции распределения для обработанного на первом этапе целевого продукта по тому же параметру управления, используя например, предложенную в [9] методику расчета.

Вывод

По результатам проведенного исследования заключают, что в приближенных к реальным для сыпучих смесей растительного происхождения условиях, принципиально, аналитически и расчетным путем обоснован процесс фракционирования данной субстанции на базе пневмосепаратора.

REFERENCES

- 1 Demskii A.B., Veden'ev V.F. Oborudovanie dlya proizvodstva muki, krupy, kombikormov [Equipment for the production of flour, cereals and animal feed (directory)]. Moscow, DeLi print, 2005. 444 p. (In Russ.).
- 2 Busroud R. Tchenie gaza so vzveshennymi chastitsami [Gas flow with suspended particles]. Moscow, Mir, 1975. 380 p. (In Russ.).
- 3 Kouzov P.A., Mal'gin A.D., Skryabin G.M. Ochistka gaza i vozdukha ot pyli v khimicheskoi promyshlennosti [Gas and air cleaning from dust in the chemical industry]: Leningrad, Khimiya, 1982. 320 p. (In Russ.).
- 4 Veden'ev V.F., Semenov E.V., Chernyshev D.Yu. Protess separirovaniya zerna i primesei, otlichayushchikhsya aerodinamicheskimi svoistvami [Process separation of grain from impurity, notable Aerodynamic properties. Theoretical bases of food technologies]. Moscow, Koloss, 2009. pp. 366-395. (In Russ.).
- 5 Crouhouish J. Research upon possibility to augment air stream separation ability for cleaning of grainy materials. Sb. Mechan Fak. Visore Sroly Zeme V Praze, 1985, no. 1, pp. 285-287.
- 6 Clarke B. Cleaning seeds by fluidiration. J. agr. engg Res., 1985, vol. 31, no. 3, pp. 231-242.
- 7 Kudryavtsev E.M. MATCHAD 2000 [MATCHAD 2000]. Moscow, DMK Press, 2001. 570 p. (In Russ.).
- 8 Daly, D. Harleman D. Mekhanika zhidkosti i gaza [Fluid and gas Mechanics]. Moscow, Energiya, 1971. 480 p. (In Russ.).
- 9 Karamzin A.V., Semenov E.V. Quantitative analysis of particulate partitioning in a centrifugal separator. ZhPKh. [J. Ap. Ch.], 2012, vol. 85, no. 10, pp. 1619-1624. (In Russ.).