

МЕХАНИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Известия ТСХА, выпуск 5, 1989 года

УДК 631.362.36:631.354.027

ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ ЗЕРНОВОГО ВОРОХА В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ПНЕВМОЦЕНТРОБЕЖНОМ СЕПАРАТОРЕ

В. М. ХАЛАНСКИЙ

(Кафедра механизации технологических процессов в с.-х. производстве)

Разработана и решена на ЭВМ математическая модель движения частиц зернового вороха в конусной камере пневмоцентробежного сепаратора, вращающейся вокруг горизонтальной оси. Установлены основные зависимости коэффициента рассеивания от кинематических и конструктивных параметров процесса, определены их оптимальные значения. Даны рекомендации для выбора указанных параметров при проектировании пневмоцентробежных сепараторов.

Анализ и классификация различных схем пневмосепараторов позволили разделить их на две группы [1, 2]. В первую входят конструкции с неподвижной камерой сепарации и вращающейся вокруг вертикальной оси камеры средой, во вторую — модели с вращающейся вокруг горизонтальной оси камерой сепарации и горизонтальным стоком воздуха.

Рассмотрим упрощенную схему рабочего процесса пневмосепаратора второй группы. Материальная частица массой m вбрасывается с некоторой скоростью на внутреннюю поверхность вращающегося усеченного конуса (рис. 1). Через перфорированную стенку конуса по всей его поверхности проходит воздух, стекающий к вентилятору (точка O_1) и воздействующий на частицу вороха M . Частица увлекается конусом во вращение и движется по его поверхности — по винтовой траектории от меньшего основания к большему. В некоторый момент времени она может оторваться от поверхности конуса и начать перемещаться под воздействием воздушного потока к вентилятору. Сила давления воздушного потока на частицу пропорциональна квадрату ее скорости относительно воздуха и направлена в противоположную этой скорости сторону. Частица обладает реальными физическими свойствами и имеет задаваемые критическую скорость и коэффициент трения скольжения, однако ее размеры не учитываются.

Рассмотрим движение частицы M в неподвижной системе координат. Начало координат поместим в плоскости меньшего основания камеры сепарации, со стороны которого в камеру подается ворох.

Ось OY направим вертикально вверх, ось OZ — по оси камеры сепарации к вершине конуса, а ось OX — перпендикулярно плоскости ZOY , как это показано на рис. 1. α — угол полураствора конуса.

На частицу M действуют сила тяжести G , сила трения $F_{\text{тр}}$, сила нормального давления N и аэродинамическая сила R . Уравнение движения частиц вороха под действием указанных сил в векторном виде запишется так:

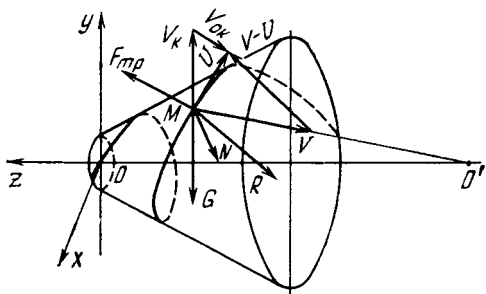


Рис. 1. Схема сил, действующих на частицу в камере сепарации ПЦС.

$$m\bar{a} = \bar{G} + \bar{F}_{\text{тр}} + \bar{N} + \bar{R},$$

где m — масса частицы; \bar{a} — абсолютное ускорение частицы.

Проекция силы тяжести направлена вертикально вниз и, следовательно, будет описываться уравнением

$$G = \begin{pmatrix} 0 \\ -mg \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Сила трения направлена в сторону, противоположную движению частицы по поверхности конуса. $F_{\text{тр}}=0$, если частица окажется вне поверхности конуса, и $F_{\text{тр}} \neq 0$, если частица находится на поверхности конуса.

$$F_{\text{тр}} = \delta F_{\text{тр}}, \quad (3)$$

$$\text{где } \delta = \begin{cases} 0 & \text{— частица вне конуса,} \\ 1 & \text{— частица на конусе.} \end{cases}$$

Рассмотрим случай $\beta=1$. Известно, что

$$F_{\text{тр}} = fN, \quad (4)$$

где f — коэффициент трения частиц вороха о поверхность камеры сепарации; N — сила нормального давления.

Учитывая равенство (3) и (4), можно записать следующее выражение для определения проекции силы трения:

$$F_{\text{тр}} = \delta f \begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где N_x , N_y , N_z — проекции силы нормального давления на оси OX , OY и OZ соответственно.

Аэродинамическая сила направлена в сторону, противоположную движению частицы относительно воздушного потока, и определяется по формуле

$$R = k\rho_b S(V-U)^2, \quad (6)$$

где V — вектор абсолютной скорости воздушного потока в рассматриваемой точке; U — вектор абсолютной скорости частицы в рассматриваемой точке; k — коэффициент сопротивления воздушного потока; ρ_b — плотность воздуха; S — миделево сечение частицы.

Учитывая, что

$$\begin{aligned} (V-U)^2 &= |V-U|(V-U), \\ |V-U| &= \sqrt{(V_x-U_x)^2 + (V_y-U_y)^2 + (V_z-U_z)^2}, \\ (V-U) &= \begin{pmatrix} V_x-U_x \\ V_y-U_y \\ V_z-U_z \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (7)$$

выражение (6) можно переписать в виде

$$R = k\rho_b S \sqrt{(V_x-U_x)^2 + (V_y-U_y)^2 + (V_z-U_z)^2} \begin{pmatrix} V_x-U_x \\ V_y-U_y \\ V_z-U_z \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Сила нормального давления направлена перпендикулярно к поверхности и описывается уравнением

$$N = \delta \cdot N \cdot n_{\text{ен}}, \quad (9)$$

$$\text{где } \delta = \begin{cases} 1 & \text{— если частица находится на поверхности конуса,} \\ 0 & \text{— если частица оторвалась от поверхности,} \end{cases}$$

$n_{\text{ен}}$ — внутренняя нормаль к конусу.

Выразим нормаль к поверхности конуса через координаты точки, в которой находится частица в данный момент времени. Для этого запишем уравнение конуса в виде

$$F(x, y, z) = x^2 + y^2 - z^2 \operatorname{tg}^2 \alpha, \quad (10)$$

где α — угол полураствора конуса.

Вектор $\operatorname{grad} F(x, y, z)$ будет направлен перпендикулярно к поверхности конуса (10). Величину вектора можно определить по следующей формуле:

$$\operatorname{grad} F(x, y, z) = \begin{bmatrix} \frac{dF}{dx} \\ \frac{dF}{dy} \\ \frac{dF}{dz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2x \\ 2y \\ -2z \operatorname{tg}^2 \alpha \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Поскольку нормалью является единичный вектор, перпендикулярный к поверхности, то

$$n_{en} = \frac{\operatorname{grad} F}{|\operatorname{grad} F|}. \quad (12)$$

Но

$$|\operatorname{grad} F| = \sqrt{(2x)^2 + (2y)^2 + (2z \operatorname{tg}^2 \alpha)^2}. \quad (13)$$

Следовательно,

$$n_{en} = \pm \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2 \operatorname{tg}^4 \alpha}} \begin{pmatrix} x \\ y \\ -z \operatorname{tg}^2 \alpha \end{pmatrix}, \quad (14)$$

где знак «—» соответствует внутренней нормали (n_{en}), знак «+» — внешней нормали.

Величину силы нормального давления находим, проектируя все силы на нормаль к поверхности в точке нахождения частицы, при условии, что частица локализуется на поверхности конуса:

$$m(a \cdot n_{en}) = N + (G \cdot n_{en}) + (R \cdot n_{en}) + (F_{\tau p} \cdot n_{en}). \quad (16)$$

Так как $F_{mp} \cdot n_{en} = 0$, то получим следующее равенство для определения силы нормального давления:

$$N = (ma - G - R) n_{en}. \quad (16)$$

Расписав вектора по координатам, получаем

$$N = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2 \operatorname{tg}^4 \alpha}} \begin{pmatrix} x \\ y \\ -z \operatorname{tg}^2 \alpha \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} ma_x + k\rho_b S \sqrt{(V_x - U_x)^2 + (V_y - U_y)^2 + (V_z - U_z)^2} (V_x - U_x) \\ ma_y + mg + k\rho_b S \sqrt{(V_x - U_x)^2 + (V_y - U_y)^2 + (V_z - U_z)^2} (V_y - U_y) \\ ma_z + k\rho_b S \sqrt{(V_x - U_x)^2 + (V_y - U_y)^2 + (V_z - U_z)^2} (V_z - U_z) \end{pmatrix} \quad (17)$$

Разделив обе части равенства (17) на m , обозначив $\frac{\sqrt{(V_x - U_x)^2 + (V_y - U_y)^2 + (V_z - U_z)^2}}{m}$ через A и учитывая, что $\frac{k\rho_b S}{m} = \frac{g}{V_{kp}^2}$,

получим следующее равенство:

$$\frac{1}{m} N = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2 \operatorname{tg}^4 \alpha}} \begin{pmatrix} x \\ y \\ -z \operatorname{tg}^2 \alpha \end{pmatrix} \begin{bmatrix} a_x + \frac{g}{V_{kp}^2} A (V_x - U_x) \\ a_y + g + \frac{g}{V_{kp}^2} A (V_y - U_y) \\ a_z + \frac{g}{V_{kp}^2} A (V_z - U_z) \end{bmatrix} \quad (18)$$

Из уравнения (18) следует, что

$$\begin{aligned} \frac{1}{m} N_x &= \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2 \operatorname{tg}^4 \alpha}} \left[a_x + \frac{g}{V_{\kappa\rho}^2} A(V_x - U_x) \right], \\ \frac{1}{m} N_y &= \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2 \operatorname{tg}^4 \alpha}} \left[a_y + g + \frac{g}{V_{\kappa\rho}^2} A(V_y - U_y) \right], \\ \frac{1}{m} N_z &= \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2 \operatorname{tg}^4 \alpha}} \left[a_z + \frac{g}{V_{\kappa\rho}^2} A(V_z - U_z) \right]. \end{aligned} \quad (19)$$

Спроецируем уравнение (1) на координатные оси:

$$\begin{cases} ma_x = -F_{m\rho x} + R_x - N_x, \\ ma_y = F_{m\rho y} - G_y - N_y - R_y, \\ ma_z = F_{m\rho z} - N_z - R_z. \end{cases} \quad (20)$$

Подставив в (20) вместо проекций значения согласно выражениям (2), (5) и (8), получим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} ma_x = -f\delta N_x - k\rho_b SA(V_x - U_x) - N_x, \\ ma_y = f\delta N_y - mg - N_y - k\rho_b SA(V_y - U_y), \\ ma_z = f\delta N_z - N_z - k\rho_b SA(V_z - U_z). \end{cases} \quad (21)$$

Разделив обе части системы уравнений на m и учитывая, что

$$\frac{k\rho_b S}{m} = \frac{g}{V_{\kappa\rho}^2}, \text{ получим}$$

$$\begin{cases} a_x = -\frac{1}{m} N_x (1 + \delta f) - \frac{g}{V_{\kappa\rho}^2} A(V_x - U_x), \\ a_y = \frac{1}{m} N_y (f\delta - 1) - g - \frac{g}{V_{\kappa\rho}^2} A(V_y - U_y), \\ a_z = \frac{1}{m} N_z (f\delta - 1) - \frac{g}{V_{\kappa\rho}^2} A(V_z - U_z), \end{cases} \quad (22)$$

где $\frac{1}{m} N_x$, $\frac{1}{m} N_y$ и $\frac{1}{m} N_z$ определяется из выражения (19).

Решение системы уравнений (22) проведено на ЭВМ с использованием программы пошагового интегрирования методом Рунге-Кутты с шагом интегрирования — 0,01 с, что дало возможность рассчитать параметры траекторий для пяти характерных частиц, критическая скорость которых равна 1,5; 4; 4,6; 6 и 10 м/с. Эти частицы представляют собой основные компоненты зернового вороха: половы, соломы и зерна. Значения основных конструктивных и кинематических параметров варьировали в пределах: скорость вбрасывания частицы U_0 — от 0 до 3 м/с, угол полураствора конуса α — от 20 до 35°; частота вращения n_κ конуса — от 200 до 800 об/мин; частота вращения частицы n_m вокруг оси OZ — от 0 до n_κ (0; $n_{\kappa/4}$; $n_{\kappa/2}$; n_κ); расход воздуха Q — от 2 до 8 м³/с; коэффициент трения частицы о поверхность конуса f — от 0,25 до 1,0; коэффициент скважности ψ — от 0,2 до 0,8.

Для определения габаритных размеров камеры сепарации (размер по оси OZ) использовали один параметр — радиус большего основания конуса, равный 0,450 м.

В качестве примера на рис. 2 приведены результаты расчета траекторий движения частицы вороха в камере сепарации, выполненной в виде усеченного конуса, радиус окружности большего основания которого равен 0,450 м.

Из рис. 2 видно, что в камере сепарации траектории частиц основных компонентов вороха не совпадают, рассеиваются, что свиде-

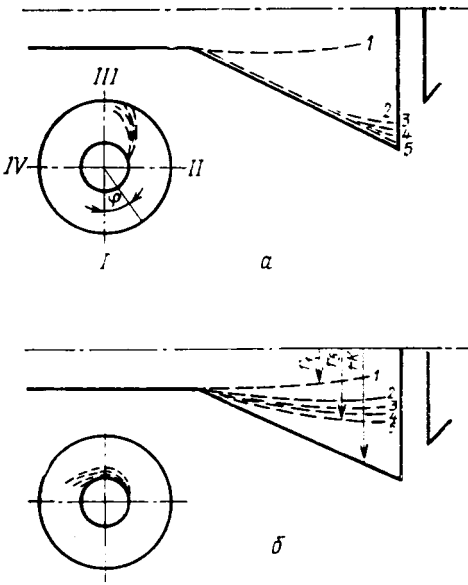


Рис. 2. Траектория движения частиц зернового вороха в камере сепарации:
a — при расходе воздуха 4 м³/с, скорости вбрасывания частицы 2 м/с; *б* — соответственно при 6 м³/с и 0 м³/с; *I* — $V_{кр} = -1,6$ м/с; 2 — 4; 3 — 4,6; 4 — 6; 5 — 10 м/с; *I*, *II*, *III*, *IV* — точки ввода вороха в камеру сепарации; r_1 — r_5 — расстояние от оси конуса до частиц 1—5; r_k — расстояние от оси до поверхности конуса.

I — $\varphi = 0^\circ$, *II* — $\varphi = 90^\circ$, *III* — $\varphi = 180^\circ$ и *IV* — $\varphi = 270^\circ$ (рис. 2).

В результате обработки и анализа материалов исследования было установлено:

— скорость вбрасывания частицы существенно изменяет показатель рассеивания траекторий частиц, входящих в зерновой ворох (рис. 3). С увеличением скорости U_0 от 0 до 2,2 м/с показатель K_p возрастает, при дальнейшем повышении U_0 от 2 до 3 м/с K_p начинает уменьшаться. Таким образом, оптимальная величина скорости вбрасывания составляет 2—2,2 м/с;

— частота вращения ротора n_p практически не влияет на расщепление траекторий движения частицы вороха (рис. 4): при увеличении n_p коэффициент рассеивания снижается незначительно. Величину n_p следует подбирать, исходя из условий обеспечения надежности протекания технологического процесса при установленной подаче; выбранную величину необходимо проверить экспериментально;

— угол полураствора конуса оказывает влияние на коэффициент рассеивания (рис. 4). Наблюдается тенденция к снижению K_p при увеличении α от 20 до 35°. Приемлемое значение — 20—25°. При уменьшении угла полураствора возрастает размер конуса по оси *OZ*. Кроме того, снижается скорость движения вороха, что приводит к увеличению его толщины на поверхности конуса;

— длина камеры сепарации (размер по оси *OZ*) коррелирует с величиной коэффициента рассеивания (рис. 5): ее увеличение сопровождается монотонным повышением K_p , максимальное значение которого наблюдается при $OZ = 0,8 h$.

Расщепление траектории движения частиц вороха зависит от зоны ввода в камеру сепарации (рис. 4). Наиболее благоприятные условия для разделения компонентов вороха создаются при вводе вороха в точках *II* и *III* ($\varphi = 90^\circ$ и $\varphi = 180^\circ$), т. е. в 1-й и 2-й четвер-

тельствует о возможности их разделения. Показатель рассеивания K_p определяется по формуле

$$K_p = \frac{r_{max} - r_{min}}{r_k},$$

где r_{max} и r_{min} — расстояние между осью *OZ* и точками, лежащими на траекториях движения крайних компонентов вороха (зерна и полосты), т. е. текущие радиусы вращения частиц 1 и 5 вокруг оси *OZ*; r_k — расстояние от оси *OZ* до поверхности конуса (текущий радиус конуса).

Очевидно, что при $K_p \rightarrow 1$ создаются наиболее благоприятные условия для разделения зернового вороха на компоненты: легкие частицы будут уноситься воздухом, а тяжелые — сходиться по поверхности конуса или вблизи ее в улавливатель. При $K_p \rightarrow 0$ траектории частиц 1 и 5 сближаются, что затрудняет раздельный отвод их из зоны сепарации.

Для определения влияния места ввода вороха в камеру сепарации частицы вбрасывали в камеру сепарации в точках

тях окружности основания конуса, считая по ходу его вращения. Поэтому загрузочное устройство должно забрасывать ворох по ходу вращения с некоторой окружной скоростью, направленной в сторону вращения конуса, что можно осуществить горизонтальным шнеком с лопаткой.

Производительность вентилятора (расход воздуха Q) оказывает наиболее существенное влияние на коэффициент рассеивания (рис. 5). Наибольшее значение K_p достигается при $Q = 4 \text{ м}^3/\text{с}$. Поэтому для пневмоочистки с $d_0 = 0,9 \text{ м}$ можно принять $Q = 4 \text{ м}^3/\text{с}$ с возможностью регулирования этого параметра от 3 до 5 $\text{м}^3/\text{с}$.

Между частотой начального вращения частицы вокруг оси OZ при вводе в камеру сепарации и K_p наблюдается сложная зависимость. При частоте вращения вороха 0; 100; 200 и 400 об/мин коэффициент рассеивания принимает значения 0,59; 0,44; 0,6 и 0,7 соответственно. Учитывая, что ворох удобнее вводить в камеру сепарации шнеком с лопаткой, которая раскручивает ворох до окружной скорости шнека, можно принять $n_{ш} = 200 \div 400 \text{ об/мин}$.

Установлено, что коэффициент трения вороха о поверхность конуса оказывает незначительное влияние на процесс рассеивания частиц и их разделение. При $l = 0,25; 0,50; 0,75$ и $1,0$ коэффициент K_p принимает значения 0,58; 0,59; 0,6 и 0,61 соответственно. Такое свойство конструкции следует считать положительным, т. к. состояние вороха не будет существенно изменять процесс.

Выводы

1. Установлено, что разработанная конструкция горизонтальной пневмоцентробежной очистки обеспечивает необходимые условия для расщепления траектории движения отдельных частиц зернового вороха, их рассеивания в камере сепарации и четкого разделения.

2. Выявлены основные параметры, оказывающие наиболее

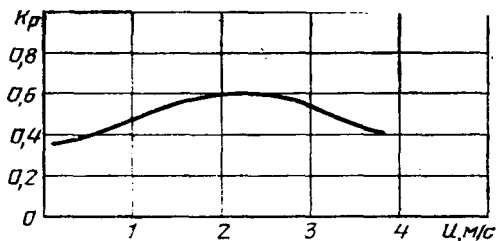


Рис. 3. Зависимость коэффициента рассеивания K_p от скорости вбрасывания вороха U ($Q=4 \text{ м}^3/\text{с}$; $\alpha=25^\circ$; $t=0,75$).

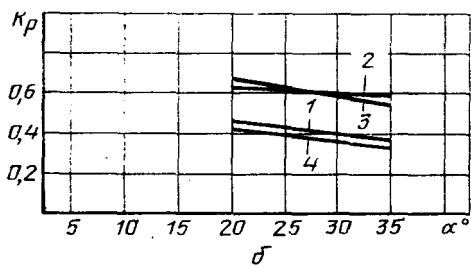
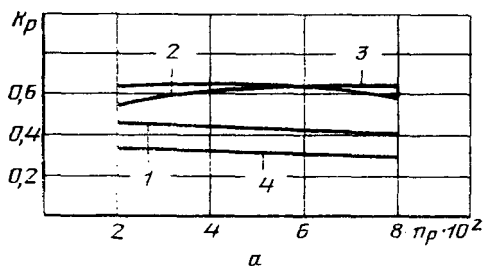


Рис. 4. Зависимость коэффициента рассеивания K_p .

a — от частоты вращения ротора p_r ; b — от угла полураствора конуса α . 1 — $\phi=0^\circ$; 2 — $\phi=90^\circ$; 3 — $\phi=180^\circ$; 4 — 270° ; $Q=4 \text{ м}^3/\text{с}$; $\alpha=25^\circ$; $U_0=2 \text{ м/с}$; $t=0,75$.

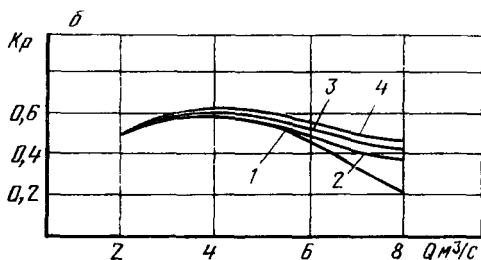
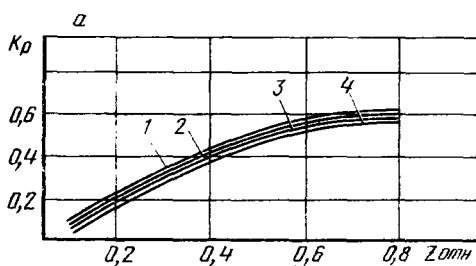


Рис. 5. Зависимость коэффициента рассеивания K_p .

a — от высоты конуса z ; b — от расхода воздуха Q ; 1 — $P_p=200 \text{ об/мин}$; 2 — 400; 3 — 600; 4 — 800 об/мин.

существенное влияние на рассеивание траекторий частиц различных компонентов зернового вороха. К ним относятся: расход воздуха — Q , скорость вбрасывания U_0 вороха в камеру сепарации по направлению оси OZ , угловая скорость n_m вращения частицы вокруг оси OZ при вводе ее в камеру сепарации; место ввода вороха в камеру сепарации, определяемое углом σ ; длина камеры сепарации и угол полураствора камеры сепарации — a .

3. Установлены значения указанных параметров, при которых создаются наиболее благоприятные условия для разделения зернового вороха на компоненты: $Q = 3,5 \dots 4,5$ м³/с; $n_k = 200 \dots 400$ об/мин; $n_m = 200 \dots 400$ об/мин; $\alpha = 25^\circ$; $OZ = Q, 8h$, диаметр окружности большого основания конуса $D_{бo}$ — 0,898 м, диаметр окружности меньшего основания конуса $D_{мo} = 0,34$ м, что соответствует диаметру загрузочного шнека $d_{ш} = 0,30 \dots 0,35$ м; $U_0 = 2 \dots 2,5$ м/с; зона ввода вороха $\varphi = 90 \dots 180$

ЛИТЕРАТУРА

1. Халанский В. М. Обоснование структурной схемы и параметров пневмоцентробежного сепаратора зернового вороха. — Изв. ТСХА, 1986, вып. 2. — 4. А. с. 1069686.
2. Халанский В. М. Классификация пневмосепараторов зернового вороха. Разработка и совершенствование рабочих органов сельскохозяйственных машин. — Сб. науч. тр. ТСХА. М., 1987. — 3. А. с. 1086564. — 4. А. с. 1069686.

Статья поступила 28 марта 1989 г.

SUMMARY

Mathematical model of grain heap parts' movement in cone chamber of pneumocentrifugal separator rotating about horizontal axis is developed and solved on a computer. Solution of the model on a computer allowed to establish the basic relationships of scattering coefficient to kinematic and structural parameters of the process, as well as to determine their optimal values. Recommendations for choosing the parameters while designing centrifugal separators are given.