

УДК 631.362.36:631.354.027

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ ЗЕРНОВОГО ВОРОХА В ПНЕВМО- ЦЕНТРОБЕЖНОМ СЕПАРАТОРЕ И ОБОСНОВАНИЕ ЕГО БАЗОВЫХ ПАРАМЕТРОВ

В.М. ХАЛАНСКИЙ, М.А. ИВАНОВ, В.ЛЫОНГ

(Кафедра с.-х. машин)

Разработана и решена на ЭВМ математическая модель движения частиц зернового вороха в камере сепарации пневмоцентробежного сепаратора с вертикальным вниз стоком закрученного потока воздуха. Установлены основные зависимости коэффициента рассеяния от кинематических и конструктивных параметров процесса, определены их оптимальные значения. Даны рекомендации для выбора указанных параметров при проектировании пневмоцентробежных сепараторов.

Снижение потерь семян и повышение их посевных качеств во многом зависят от изыскания наиболее эффективных процессов выделения семян из вороха, их очистки и сортирования. Определенный интерес в этом отношении представляют новые направления интенсификации очистки и сортирования семян в пневмосепараторах, в основу конструкции которых положен принцип замены поступательного движения воздушного потока с введенным в него зерновым ворохом — вращательным и значительного ускорения рабочего процесса.

Результаты проведенных на кафедре сельскохозяйственных машин Тимирязевской академии исследований по указанной проблеме показали принципиальную возможность очистки и сортирования зерна в закрученном 2-фазном потоке. На основании материалов выполненных исследований разработан пневмоцентробежный сепаратор (ПЦС) многоцелевого назначения с движущимся вниз закрученным потоком вороха и восходящим воздушным потоком. Лабораторные и полевые испытания сепаратора в системе очистки зерноуборочного

комбайна и стационарного ворохоочистителя выявили как достоинства, так и недостатки реализованной в ПЦС аэродинамической схемы [3—5]. К недостаткам относятся неэффективные энергетические затраты, так как рабочий процесс построен по схеме: разгон вороха — торможение частиц незерновой фракции до полной остановки — повторный разгон в обратном направлении. Для устранения указанного недостатка разработана схема пневмоцентрибегового сепаратора с прямоточным протеканием рабочего процесса [4, 5].

Рассмотрим упрощенную схему рабочего процесса такого ПЦС при следующих допущениях: частицы представляют тело шаровидной формы диаметром d и массой m , физико-механические свойства материала и среды (коэффициент трения f , критическая скорость $V_{кр}$, масса частицы m , коэффициент сопротивления среды K , плотность среды ρ и др.) не изменяются, вращение частиц и их взаимодействие отсутствуют. Камера сепарации выполнена в виде усеченного конуса, обращенного большим основанием вверх, а боковая поверхность его — про-

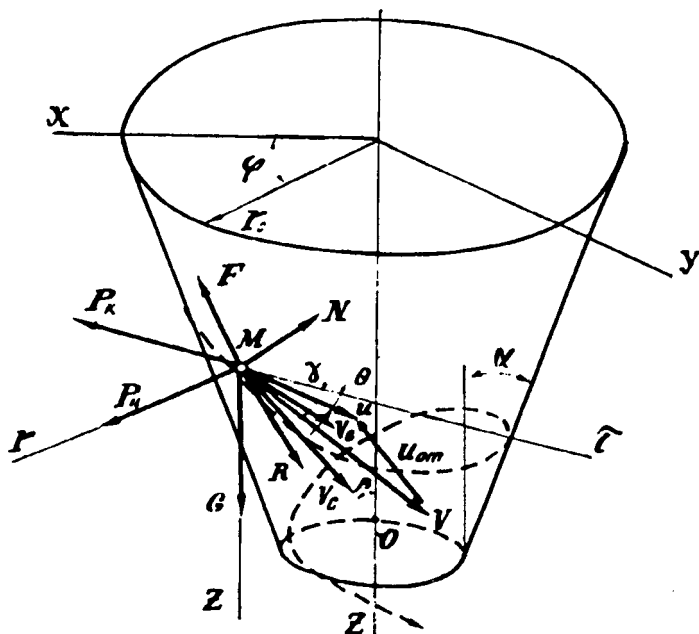


Рис. 1. Схема сил, действующих на частицу в камере сепарации ПЦС.

зрачна для фильтрации воздуха (составлен из каскада конических колец, перфорированная поверхность и др.). Частица М массой m вбрасывается с некоторой скоростью U_0 под углом θ (рис. 1) в камеру сепарации и движется по внутренней поверхности конуса сверху вниз по криволинейной траектории $\phi(r, \tau, \beta, t)$ до момента схода ее с нижней кромки конуса (1-й случай) или отрыва ее от поверхности конуса (2-й случай). При движении частицы по поверхности конуса и после ее отрыва на нее действует воздушный поток, вращающийся вокруг оси О конуса с угловой скоростью ω_b и стекающий со скоростью V_c к точке 0, в которой установлена приемная труба, соединенная с всасы-

вающим коллектором вентилятора. Место установки трубы располагается ниже точки ввода частицы в камеру сепарации на расстоянии $Z_0 = \delta h$ ($h = r_0 / \text{tg} \alpha$ — высота конуса; $0 \leq \delta \leq 1$). Скорость V_c стока воздушного потока в точке М определяется из условия, что весь объем проходит через поверхность сферического сегмента, радиус $R_{\text{сф}}$ которого равен расстоянию от точки М до точки 0.

$$V_c = \frac{Q}{2\pi R_{\text{сф}}^2 \left(1 - \frac{Z_1}{R_{\text{сф}}}\right) \cdot \eta} \quad (1)$$

где Q — расход воздуха; η — коэффициент скважности вороха; Z_1 — высота сегмента, вычисляемая по формуле

$$Z_1 = \frac{-Z_0 \cdot \text{tg}^2 \alpha + \sqrt{R_{\text{сф}}^2 (1 + \text{tg}^2 \alpha) - Z_0^2 \text{tg}^2 \alpha}}{1 + \text{tg}^2 \alpha} \quad (2)$$

Коэффициент скважности вороха вычисляется по формуле

$$\eta = 1 - \frac{3qt}{\rho_M \pi \left(\frac{r_0^3}{\text{tg} \alpha} + r_0^2 Z_0 + Z_0^2 \text{tg} \alpha r_0 \right)} \quad (3)$$

где q — подача вороха; t — время пребывания частицы в камере сепарации; ρ_M — объемная плотность вороха.

Принимаем, что скорость стока воздуха имеет постоянное значение в любой точке сферической поверхности сегмента, т.е. $V_c^M = \text{const}$, а угловая скорость вращения воздуха

$$\omega_B = \frac{V_0 \cos \gamma}{r} = \text{const.}$$

Здесь $V_0 \cos \gamma$ — тангенциальная составляющая скорости движения воздуха; γ — угол между вектором скорости V_0 и касательной τ к поверхности конуса; V_0 — скорость воздуха на входе в конус.

Исходя из перечисленных условий и с учетом действующих сил (рис. 1) тяжести $G = mg$; аэродинамического сопротивления $R = K \rho_a \pi d^2 / 4 U_{\text{ст}}^2$; центробежной $P_{\text{ц}} = m \omega^2 r$; кориолисовой $P_{\text{к}} =$

$= 2\omega_b U$; нормального давления $N = \phi(\dot{G}, R, P_v)$; трения $F = fN$. После некоторых преобразований система дифференциальных

уравнений движения частицы в цилиндрической системе координат запишется так:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{r} &= r\dot{\phi}^2 + 2\frac{g}{V_{кр}^2}|U_{от.}|(V_r - \dot{r}) - N'\cos\alpha + \frac{\dot{r}}{|U|}fN'; \\ \tau &= \frac{g}{V_{кр}^2}|U_{от.}|(V_\tau - r\dot{\phi}) - \frac{2rV_{\tau_0}}{r_0} - \frac{r\dot{\phi}}{|U|}fN'; \\ \ddot{Z} &= g + \frac{g}{V_{кр}^2}|U_{от.}|(V_z - \dot{Z}) - N'\sin\alpha - \frac{\dot{Z}}{|U|}fN'; \\ \frac{dr}{dt} &= \dot{r}; \quad \frac{d\phi}{dt} = \dot{\phi}; \quad \frac{dZ}{dt} = \dot{Z}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $|U_{от.}|$ — скорость обтекания частицы потоком воздуха; $|U|$ — абсолютная скорость частицы; V_r ; V_τ и V_z — радиальная, танген-

циальная и осевая составляющие скорости воздушного потока.

Значение нормального давления находим, проектируя все силы

$$U_{от} = \sqrt{(V_r - \dot{r})^2 + (V_\tau - r\dot{\phi})^2 + (V_z - \dot{Z})^2}; \quad (5)$$

$$|U| = \sqrt{r^2 + r^2\dot{\phi}^2 + \dot{Z}^2}; \quad (6)$$

$$V_r = -V_c \frac{r}{\sqrt{r^2 + Z^2}}; \quad (7)$$

$$V_z = V_c \frac{Z}{\sqrt{r^2 + Z^2}}; \quad (8)$$

$$V_\tau = \omega_B r. \quad (9)$$

на нормаль к поверхности конуса в точке нахождения частицы, при условии, что частица локали-

зуется на поверхности конуса. После преобразований уравнение для вычисления N запишется так:

$$N' = \frac{N}{m} \left[r \cdot \varphi^2 \cos \alpha + \frac{g}{V_{кр}^2} |U_{от}| (V_r - \dot{r}) \cos \alpha - \frac{g}{V_{кр}^2} |U_{от}| (V_z - \dot{Z}) \sin \alpha - g \sin \alpha \right] \quad (10)$$

При моделировании решается задача описания движения частиц и оптимального проектирования геометрических и аэродинамических параметров камеры сепарации. Для эффективного функционирования ПЦС при гиперкритических режимах обтекания частицы воздухом оптимальными могут быть параметры камеры сепарации и режимы течения среды, которые обеспечивают:

- наиболее благоприятные условия для рассеяния пучка траекторий разделяемых компонентов;
 - устойчивое движение зерна по стенке камеры сепарации или вблизи нее к выгрузному отверстию;
 - отрыв частиц незерновой фракции от стенки в начальной стадии процесса и устойчивое их движение к точке стока воздуха.
- Исходя из представленного

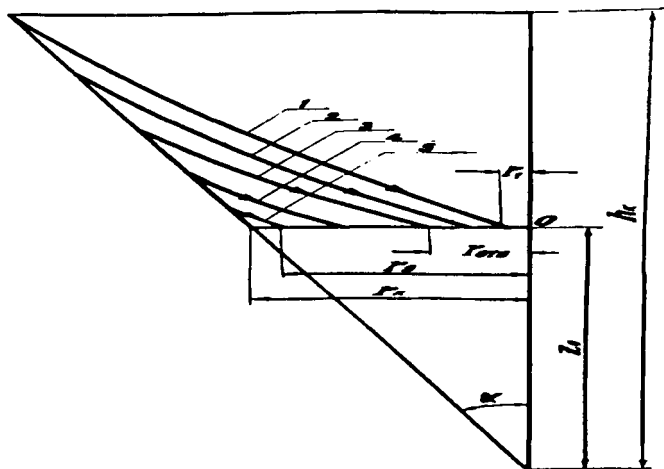


Рис. 2. Траектории движения частиц зернового вороха в камере сепарации. 1 — $V_{кр} = 1,5$ м/с; 2 — 4 м/с; 3 — 5,5 м/с; 4 — 6 м/с; 5 — 10,5 м/с. $Q = 2$ м³/с; $\alpha = 0,52$ рад; $r_0 = 0,3$ м; $Z_0 = 0,2$ м.

(желасмого) образа камеры сепарации и необходимости учета многих факторов ее оптимизация сводится к решению сложной многокритериальной экстремальной задачи. Для ее решения использовали метод последовательной частной оптимизации, при которой оптимальные значения параметров определяются не одновременно, а поэтапно.

В качестве критерия оптимизации использован безразмерный комплекс — коэффициент рассеяния

$$K_p = \frac{r_5 - r_1}{r_k},$$

где r_5 , r_1 и r_k — расстояние (рис. 2) от оси 0 до точки, лежащей на траектории движения соответственно тяжелой, легкой частиц и до стенки конуса в плоскости сечения, проходящем через точку 0. Очевидно, что при $K \rightarrow 1$ создаются наиболее благоприятные условия для разделения зернового вороха на компоненты: траектории их максимально удалены одна от другой. При $K \rightarrow 0$ траектории крайних частиц сближаются, что затрудняет их раздельный отвод из зоны сепарации.

Решение системы уравнений (4) проведено на ЭВМ с использованием программы пошагового интегрирования с использованием стандартного метода Рунге — Куты решения обыкновенных дифференциальных нелинейных уравнений с шагом интегрирования 0,01с.

В зависимости от режима движение частицы может быть по поверхности конуса ($N \neq 0$, $F \neq 0$) или

вне стенки конуса ($N = 0$, $F = 0$). Очевидно, переход от системы, описывающей движение частицы по поверхности конуса, к системе, описывающей движение ее вне стенки, должен происходить автоматически в процессе счета программы. Поэтому на каждом шаге по времени проверяются условия:

$$r = (r_0 - Ztg\alpha - d/2) - \text{частица на стенке,}$$

$$r < (r_0 - Ztg\alpha - d/2) - \text{частица вне стенки.}$$

Были рассчитаны параметры траекторий для 5 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 $U_0 = 0 \dots 15$ м/с; угол полураствора конуса $\alpha = 0,26 \dots 0,7$ рад; расход воздуха $Q = 0,5 \dots 6,0$ м³/с; расстояние от вершины конуса до точки стока $Z_0/h = 0,192 \dots 0,868$; коэффициент трения $f = 0,2 \dots 1,0$; радиус окружности основания конуса $r_0 = 0,25 \dots 1,0$ м.

В качестве примера на рис. 2 приведены результаты расчета траекторий движения указанных 5 частиц в камере сепарации с параметрами $R_0 = 0,3$ м; $\alpha = 30^\circ$.

Из рис. 2 видно, что в камере сепарации траектории частиц основных компонентов вороха не совпадают, рассеиваются в пучок, что свидетельствует о возможности их разделения.

В результате обработки и анализа материалов исследования было установлено:

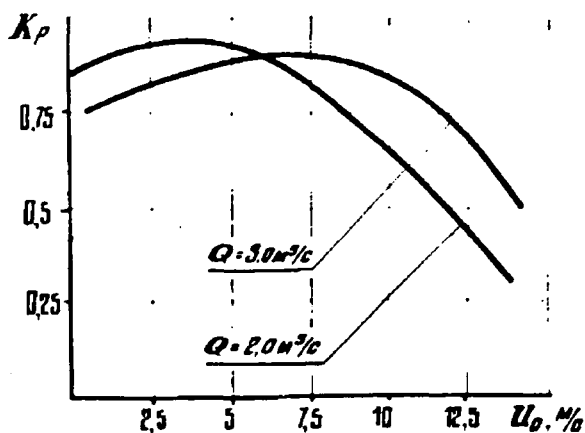


Рис. 3. Зависимость коэффициента рассеяния K_p от скорости вбрасывания вороха U_0 : $\alpha = 0,52$ рад; $r_0 = 0,3$ м; $Z_0 = 0,2$ м.

1. Скорость вбрасывания частицы существенно изменяет показатель рассеивания траекторий частиц, входящих в зерновой ворох (рис. 3). С увеличением скорости U_0 от 0 до 3 м/с (при $Q = 2$ м³/с) и от 0 до 7 м/с (при $Q = 3$ м³/с) показатель K_p возрастает, при дальнейшем повышении скорости K_p начинает уменьшаться. Таким образом, для постоянного расхода воздуха имеется диапазон оптимальных значений скорости вбрасывания.

2. Влияние угла вбрасывания вороха θ на коэффициент рассеяния определяется диапазоном вариации скорости ви-

тания частиц вороха: при большом диапазоне (1,5...10,5 м/с) влияние θ незначительное, при меньшем диапазоне (5,5...10,5 м/с при сортировании очищенных семян) оно становится заметным. Лучшие условия создаются при $\theta < 0,526$ рад.

3. Угол полураствора конуса α оказывает заметное влияние на коэффициент рассеивания (рис. 4). Наблюдается тенденция к снижению K_p при увеличении α от 0,47 до 0,65 рад. Приемлемое значение — 0,35—0,47 рад. При уменьшении угла полураствора возрастает размер конуса по оси Z .

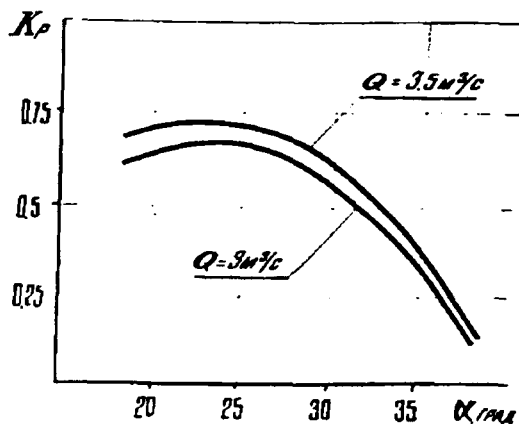


Рис. 4. Зависимость коэффициента рассеяния K_p от угла α полураствора конуса: $r_0 = 0,3$ м; $Z_0 = 0,2$ м.

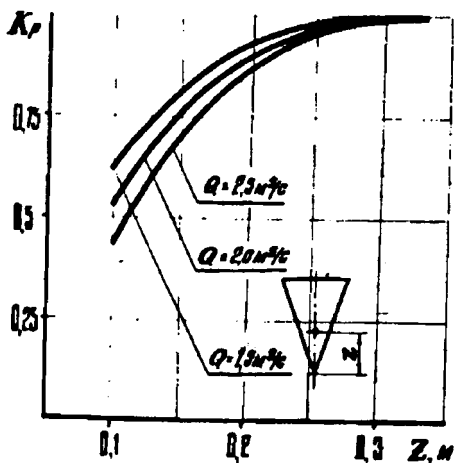


Рис. 5. Зависимость коэффициента рассеяния K_p от положения точки стока воздуха Z_0 : $\alpha = 0,52$ рад; $r_0 = 0,3$ м.

4. Положение точки 0 стока воздуха заметно влияет на коэффициент рассеяния (рис. 5) и имеет оптимальное значение при $Z_0/h \geq 0,384$.

5. Расход воздуха оказывает наиболее существенное влияние на коэффициент рассеяния (рис. 6). Наибольшее значение K_p достигается при $Q = 2 \dots 3$ м³/с для вариации очистки зерна ($V_{xp} = 1,5 \dots 10,5$ м/с) и при $3 \dots 4$ м³/с — для варианта сортирования зерна ($V_{xp} = 5,5 \dots 10,5$ м/с). Установлено, что коэффициент трения вороха о поверхность конуса

оказывает незначительное влияние на процесс рассеяния частиц и их разделение.

Такое свойство конструкции следует считать положительным, так как состав и состояние вороха не будут заметно изменять процесс.

Для использования результатов расчетов при анализе рабочего процесса реальных пневмоцентробежных сепараторов различных размеров и геометрии при обработке вороха с любыми аэродинамическими свойствами частиц необходимо представить результаты исследований в виде обобщенных зависимостей, по которым можно было бы предсказать поведение частиц в камере сепарации без дополнительных расчетов для каждого конкретного случая.

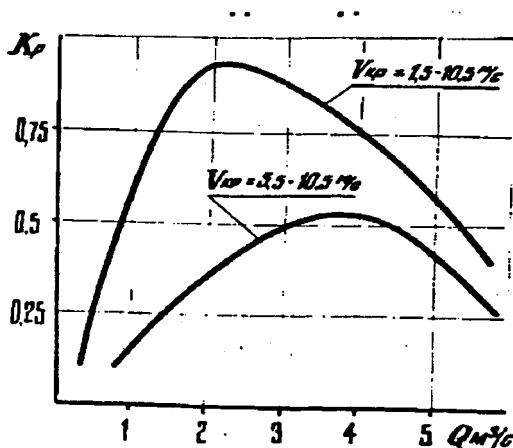


Рис. 6. Зависимость коэффициента рассеяния K_p от расхода воздуха Q : $r_0 = 0,3$ м; $\alpha = 0,52$ рад; $Z_0 = 0,2$ м.

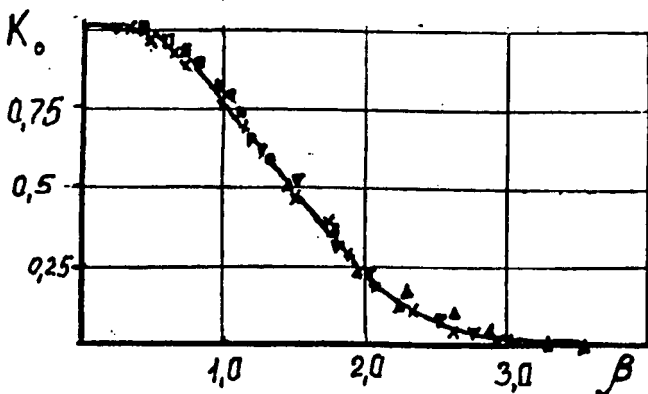


Рис. 7. Зависимость $K_0 = r/r_k$ от безразмерного параметра β .

Для решения поставленной задачи выделено 2 критерия подобия: отношение расхода воздуха к критической скорости частицы $Q/V_{кр}$ и геометрическое подобие. Анализ полученных уравнений (4) с учетом указанных критериев позволил определить условия подобия: при увеличении $V_{кр}$ в k раз $Q_n = kQ_m$, а при увеличении r_0 в k раз $Q_n = K^2Q_m$. Здесь Q_n и Q_m — соответственно расход воздуха для проектируемого сепаратора и модели.

Полученные соотношения позволяют по расчетным значениям $K_p = f(r_0, Q, V_{кр})$ построить безразмерные зависимости (рис. 7) отклонения частиц от стенки в плоскости выгрузного отверстия (нижнего основания конуса) r/r_k в зависимости от безразмерного параметра β .

$$\beta = \frac{Q}{\pi r_0^2 V_{кр}}$$

На рис. 6 различными значками показаны результаты расчетов, пересчитанных в соответствующие безразмерные параметры. Результаты с большой точностью легли на одну кривую.

Использование кривой $K_0 = r/r_k = f(\beta)$ позволяет без проведения расчетов на ЭВМ определять значение одного из параметров $Q, r_0, V_{кр}$ (при фиксированном значении двух других), при котором частица отклоняется от стенки конуса на заданную величину.

Выводы

1. Установлено, что разработанная конструкция пневмоцентробежного сепаратора с вертикальным вниз стоком воздушного потока обеспечивает необходимые условия для расщепления траекторий движения отдельных частиц зернового вороха, их рассеяние в камере сепарации и четкого разделения.

2. Выявлены основные параметры, оказывающие наиболее заметное влияние на рассеяние траекторий частиц различных компонентов зернового вороха. К ним относятся: расход воздуха — Q , скорость вбрасывания U_0 вороха в камеру сепарации, угол полураствора конуса α , положение точки 0 стока воздуха Z_0/h .

3. Установлены значения указанных параметров, при которых создаются наиболее благоприятные условия для разделения зернового вороха на компоненты: $Q = 2...3$ м/с, $\alpha = 0,35...0,47$ рад, $Z_0/h = 0,384$, $U_0 = 3...4$ м/с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент № 1699662, БИ 1991, № 47. — 2. Патент № 1699663, БИ

1991, № 47. — 3. Халанский В.М., Горбачев И.В., Сиротин А.В., Царегородцев А.Ю. Исследование пневмоцентробежных сепараторов зернового вороха. Отчет по НИР. № гос.регистрации 01850078371, инв.№ 02860002100, ТСХА, М., 1984. — 4. Халанский В.М. Обоснование структурной схемы и параметров пневмоцентробежного сепаратора зернового вороха. — Изв. ТСХА, 1986, вып. 2, с. 49—55. — 5. Халанский В.М. Классификация пневмосепараторов зернового вороха. — В сб.: Разработка и совершенствование рабочих органов с.-х. машин. М.: МСХА, 1987.

*Статья поступила 20 июня
1997 г.*

SUMMARY

Mathematical model of motion of grain heap particles in separation chamber of pneumocentrifugal separator with vertical down run-off of whirled air flow has been developed and solved on computer. The main dependences of scattering coefficient on kinematic and structural parameters of the process are found, their optimum values are determined. Recommendations are given for choosing the indicated parameters in designing pneumocentrifugal separators.