

УДК 664.7

# Моделирование процесса пневмокриоэлектросепарации сырья биологического происхождения

Д-р техн. наук **Е. В. СЕМЁНОВ**, д-р техн. наук **Б. С. БАБАКИН**,  
д-р техн. наук **М. И. ВОРОНИН**, **В. А. ВЫГОДИН**, **С. Б. БАБАКИН**  
Московский государственный университет пищевых производств,  
109316, г. Москва, ул. Талалихина, 33

**Quality analysis of cinematic characteristic of mechanically and geometrically different particles of frozen and milled biological raw materials mixture suspended in the air upstream on the basis conservation of momentum has been carried out. Effectiveness calculation of pneumatic mixture separation in chamber electroseparators on the basis of physicomechanical and geometrical data parameter has been substantiated.**

**Keywords:** pneumocryoseparation, electric field, the air flow, the drag coefficient.

**Ключевые слова:** пневмокриоэлектросепарация, электрическое поле, воздушный поток, коэффициент аэродинамического сопротивления.

Для применения безотходной энергосберегающей технологии переработки сырья биологического происхождения с использованием электрической сепарации необходимо обоснование эффективности данной технологии. В частности, из-за несовершенства конструкции электросепараторов снижается эффективность разделения сырья.

Авторами, на основе закона сохранения импульса, исследуется кинематика изолированной частицы, взвешенной в восходящем воздушном потоке под действием сил разной природы, проводится качественный анализ эффективности процесса разделения смеси в пневмосепарирующем канале криоэлектросепаратора.

Рассматривается задача, когда в межэлектродном пространстве криоэлектросепаратора индуцировано электрическое поле постоянной напряженности с учетом кинетики зарядки частицы.

Предполагается также, что кинетика частиц в плоскостях, параллельных рассматриваемой, примерно одинакова и принято ограничиваться анализом плоского движения частицы.

Так как исследуемый процесс криоэлектросепарирования смеси под действием сил электростатического поля и других сил осложнен многими факторами, то количественное моделирование данного процесса, помимо принятых выше допущений, может быть осуществлено лишь при дополнительной схематизации рассматриваемого явления.

В качестве упрощающих предположений, полагаемых в основу схемы процесса пневмокриоэлектросепарирования смеси в потоке воздуха, используются допущения, не сильно искажающие реальную картину протекания исследуемого явления. Кроме того, предполагаем, что основной поток (поток воздуха) одномерный, а распределение скорости воздуха по поперечному сечению потока незначительно отличается от расходной скорости его.

С большой достоверностью принимается, что в реальных условиях кинетика частиц в рабочем объеме пневмокриоэлектросепаратора протекает при существенных числах Рейнольдса. Поэтому в качестве закона

сопротивления движению частицы со стороны потока воздуха может быть принято квадратическое распределение по местной (относительной) скорости частицы в потоке.

При исследовании поставленной задачи координатная ось  $y$  направлена вверх (против силы тяжести), а ось  $x$  — перпендикулярно оси  $y$  (по направлению силы Кулона) (рис. 1).

Поскольку на частицу в потоке воздуха действуют сила тяжести  $G$ , сила Кулона  $F_k$  и сила сопротивления  $F_c$ , то согласно основному закону динамики для точки справедливо уравнение [1]

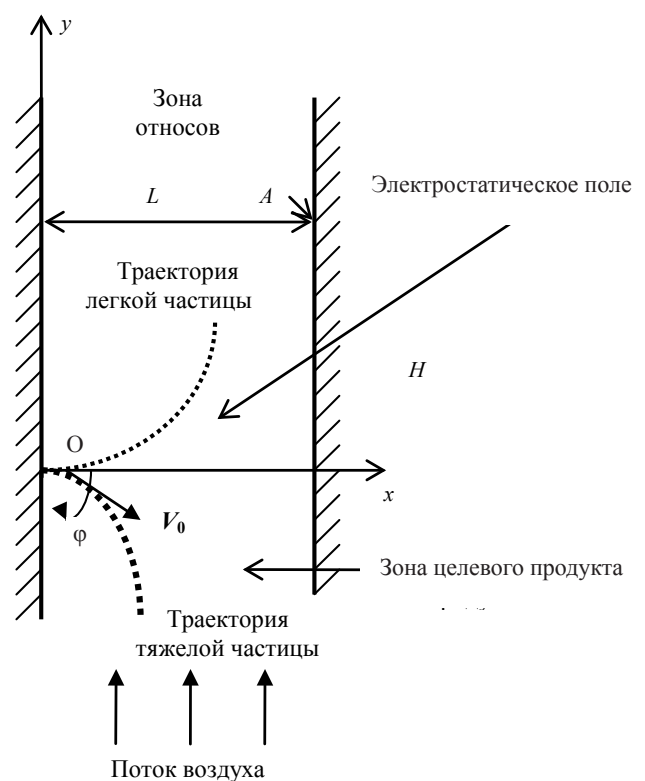


Рис. 1. Схема траекторий движения частиц в восходящем воздушном потоке криоэлектросепаратора

$$mdV/d\tau = G + F_k + F_c \quad (1)$$

где  $m$  — масса частицы, кг;  $\tau$  — время, с;  $G = \{0, -mg\}$  — вектор силы тяжести;  $g$  — ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;  $F_k = Eq$  — сила Кулона,  $E$  — напряженность электрического поля, В /м;  $q$  — заряд частицы, Кл;  $F_c = -k_1 V_{отн} |V_{отн}|$  — вектор силы сопротивления воздуха, Н;  $k_1 = 0,5\rho_b c_y S$  — коэффициент пропорциональности,  $\rho_b$  — плотность воздуха,  $kg/m^3$ ;  $c_y$  — аэродинамический коэффициент сопротивления;  $S$  — площадь проекции частицы на плоскость, нормальную направлению ее движения,  $m^2$ ;  $V = \{V_x, V_y\}$  — вектор скорости частицы,  $V_{отн} = v - U$ ,  $U = \{0, U\}$ ,  $U$  — скорость потока воздуха,  $U > 0$ ,  $V_{отн}$  — вектор местной скорости частицы, м/с.

Если плотность объемного заряда частицы постоянна, частица имеет сферическую форму диаметром  $d$ , а электрическое поле индуцируется коронным электродом, то заряд сферической частицы размером не менее 2 мкм рассчитывают по формуле Потенье [1].

В таком случае силу Кулона можно представить в виде [1, 2]

$$F_k = q_m \tau / (\tau + \tau_3) i, \quad (2)$$

где  $i$  — единичный орт оси  $x$ ,

$$q_m = \epsilon_0 E^2 (1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}) d^2, \quad \tau_3 = 4\epsilon_0 / (en_0 k). \quad (3)$$

где  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость частицы;  $e$  — заряд электрона, Кл;  $n_0$  — концентрация ионов,  $1/m^2$ ;  $k$  — подвижность ионов,  $m^2/(B \cdot c)$ .

Проецируя векторное уравнение (1) на оси координат с учетом формулы Потенье, получим [5]

$$mdV_x/d\tau = q_m \tau / (\tau + \tau_3) - k_1 V_x |v|, \quad (4)$$

$$mdV_y/d\tau = -mg - k_1 (V_y - U) |v|. \quad (5)$$

Имея в виду, что  $|v| = [V_x^2 + (V_y - U)^2]^{1/2}$ , согласно уравнениям (4), (5) будем иметь

$$dV_x/d\tau = q_{уд} \tau / (\tau + \tau_3) - k V_x [V_x^2 + (V_y - U)^2]^{1/2}, \quad (6)$$

$$dV_y/d\tau = -g - k (V_y - U) [V_x^2 + (V_y - U)^2]^{1/2}. \quad (7)$$

где  $q_{уд} = q_m / m$  — удельный заряд, Кл/кг;  $k = k_1 / m$  — множитель пропорциональности силы сопротивления воздуха,  $1/m$ .

Считая, что обрабатываемая сыпучая смесь подается в рабочий канал сепаратора под углом  $\phi$  со скоростью  $V_0$ , решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений (3) и (4) согласуется с начальным условием

$$V_x = V_0 \cos\phi, \quad V_y = V_0 \sin\phi \quad \text{при } \tau = 0. \quad (8)$$

В простейшем случае, когда горизонтальная составляющая начальной скорости  $V_{x0}$  частицы невелика, и движение ее (при немалом значении  $U$ ) развивается в основном в вертикальном направлении, на основе уравнения (7) может быть дана примерная оценка величины скорости витания частицы. Для чего, пользуясь неравенствами  $V_x < v$ ,  $(V_x^2 + v^2)^{1/2} \approx |v| = -v > 0$ , а также условием  $dV_y/d\tau = 0$ , приходим к приближенному уравнению

$$-g - kv (V_x^2 + v^2)^{1/2} \approx -g + kv^2 = 0,$$

откуда, выбирая отрицательное значение корня, следует выражение скорости витания частицы

$$v = -[2mg / (\rho_b c_y S)]^{1/2},$$

или, при условии, что частица имеет сферическую форму,

$$v = -[4\rho_t dg / (3\rho_b c_y)]^{1/2},$$

где  $\rho_t$  — плотность частицы,  $kg/m^3$ .

Принимая, ориентировочно,  $d = 0.002$  м,  $\rho_n = 1200$   $kg/m^3$ ;  $\rho_b = 1,3$   $kg/m^3$ ;  $c_y = 1$ , получим приближенное значение скорости витания частицы

$$v = -[4 \times 1200 \times 0,002 \times 9,8 / (3 \times 1 - 3 \times 1)]^{1/2} = -4,92 \text{ м/с},$$

что близко к значению (по модулю) скорости потока воздуха  $U = 6$  м/с.

Поскольку система уравнений (6) и (7) является нелинейной относительно искомым проекций скорости  $V_x$  и  $V_y$ , то ее решение может быть найдено лишь численным методом.

Для того чтобы получить зависимости, позволяющие прогнозировать результаты сепарирования смеси в вертикальном пневмосепарирующем канале, необходимо иметь, даже если и упрощенное, но аналитическое решение задачи (6)–(8) по проекциям скорости частицы и ее координатам. С помощью численного моделирования (в критериальной форме) задачи Коши (6)–(8), на базе стандартных процедур, в области реальных значений параметров процесса было выявлено, что неравенство  $V_x^2 < (V_y - U)^2$  обычно выполняется. Поэтому, имея в виду, что  $U - V_y > 0$ , вместо уравнений (6) и (7) можем приближенно записать

$$dV_x/d\tau = q_{уд} \tau / (\tau + \tau_3) - k V_x |V_y - U|, \quad (9)$$

$$dV_y/d\tau = -g - k (V_y - U) |V_y - U|. \quad (10)$$

Вводя скорость  $w = V_y - U \leq 0$  ( $v \leq 0$ ) витания частицы и учитывая что  $V_x > 0$ , системе уравнений (6), (7) придаем форму

$$dV_x/d\tau = q_{уд} \tau / (\tau + \tau_3) + k V_x w, \quad (11)$$

$$dw/d\tau = -g + kw^2. \quad (12)$$

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

$$V_x = V_{x0} = V_0 \cos\phi, \quad w = w_0 \quad \text{при } \tau = 0, \quad (13)$$

где  $w_0 = V_0 \sin\phi - U$ .

После ряда преобразований и введения обозначений  $a = 2\sqrt{gk}$ ,  $b = \sqrt{g/k}$  находим

$$w = \frac{b(c - e^{a\tau})}{c + e^{a\tau}}, \quad (14)$$

где  $c = |(b + w_0)/(b - w_0)|$ .

В соответствии с (14)

$$V_y = U + w = U + \frac{b(c - e^{a\tau})}{c + e^{a\tau}}. \quad (15)$$

Подставляя (15) в уравнение (11), будем иметь

$$\frac{dV_x}{d\tau} = k V_x \frac{b(c - e^{a\tau})}{c + e^{a\tau}} + \frac{q_{уд} \tau}{\tau + \tau_3}$$

$$\text{или} \quad \frac{dV_x}{d\tau} - kV_x \frac{b(c - e^{a\tau})}{c + e^{a\tau}} = \frac{q_{yd}\tau}{\tau + \tau_3}. \quad (16)$$

Уравнение (16) представляет собой линейное дифференциальное уравнение относительно  $V_x$  по переменной  $\tau$ , общим решением которого является [6]

$$V_x = e^{kb \int \frac{c - \exp(a\tau)}{c + \exp(a\tau)} d\tau} \left[ q_{yd} \int \frac{\tau}{\tau + \tau_3} e^{-kb \int \frac{c - \exp(a\tau)}{c + \exp(a\tau)} d\tau} d\tau + C_1 \right]$$

или, после интегрирования

$$V_x = \exp \{ kb [\tau - (2/a) \ln |c + \exp(a\tau)|] \} \times \left( \int q_{yd} \frac{\tau}{\tau + \tau_3} \exp \{ -kb [\tau - (2/a) \ln |c + \exp(a\tau)|] \} d\tau + C_1 \right), \quad (17)$$

где  $C_1$  — произвольная постоянная.

Согласуя (17) с (13), находим частное решение — выражение проекции на ось  $x$  скорости частицы

$$V_x = V_{x0} + \exp(kb\tau) / [c + \exp(a\tau)]^{2/a} \times \left( \int q_{yd} \frac{\tau}{\tau + \tau_3} \exp \{ -kb [\tau - (2/a) \ln |c + \exp(a\tau)|] \} d\tau \right). \quad (18)$$

Проводя в формуле (18) потенцирование, будем иметь

$$V_x = V_{x0} + \exp(kb\tau) / [c + \exp(a\tau)]^{2/a} \times \left( q_{yd} \int \frac{\tau}{\tau + \tau_3} \exp(-kb\tau) [c + \exp(a\tau)]^{2/a} d\tau \right)$$

или, с учетом того, что  $kb = a/2$

$$V_x = V_{x0} + q_{yd} \exp(a\tau/2) / [c + \exp(a\tau)]^{2/a} \times \left( \int \frac{\tau}{\tau + \tau_3} \exp(-a\tau/2) [c + \exp(a\tau)]^{2/a} d\tau \right). \quad (19)$$

Поскольку  $V_x = dx/d\tau$ ,  $V_y = dy/d\tau$ , на основе (15), (19) могут быть найдены зависимости декартовых координат частицы от времени

$$x(\tau) = \int V_x d\tau + C_3, \quad (20)$$

$$y(\tau) = \int V_y d\tau = \int \left( U + \frac{b(c - e^{a\tau})}{c + e^{a\tau}} \right) d\tau = U\tau + (2b/a) \ln [(c + 1) e^{a\tau/2} / (c + e^{a\tau})] + C_4, \quad (21)$$

где  $C_3, C_4$  — произвольные постоянные,  $V_x$  — рассчитывается по (19).

При этом следует отметить, что входящие в (19), (20) интегралы по переменной  $\tau$  являются не берущимися.

Удовлетворяя общее решение (21), (22) начальным условиям

$$x = 0, y = 0 \text{ при } \tau = 0,$$

приходим к выражению уравнения траектории частицы в параметрической по времени  $\tau$  форме

$$x(\tau) = \int V_x d\tau, \quad (22)$$

$$y(\tau) = U\tau + (1/k) \ln [(c + 1) e^{a\tau/2} / (c + e^{a\tau})]. \quad (23)$$

Несмотря на то, что согласно (19), (20) выражение  $x(\tau)$  по (22) вычисляется как неявная двойная квадратура по переменной  $\tau$ , с помощью (22), (23), в принципе, могут быть количественно промоделированы зависимости координат  $x$  и  $y$  от времени  $\tau$ . Однако эффективно прогнозировать результаты сепарирования частиц взвеси

в восходящем воздушном потоке в электростатическом поле можно лишь располагая выражением связи между переменными  $x$  и  $y$ , пусть и в неявной, форме, а также визуализируя траектории частицы в рабочем объеме аппарата. Как видно, даже из (23) в явной форме невозможно найти зависимость  $\tau$  от  $y$ . Для того чтобы получить численным путем зависимость  $y = y(x)$  выражаем сначала, как неявный корень по  $\tau$  трансцендентного уравнения (22), в зависимости от  $x$ , т. е. находим  $\tau = \tau(x)$ . Затем, найденную в виде корня (22), зависимость  $\tau = \tau(x)$  подставляем в (23). Если выполнять данную вычислительную процедуру, например, в такой вычислительной программе как MATCAD [7], то выкладки, связанные с получением зависимости  $\tau = \tau(x)$  в символьном виде можно осуществить, используя оператор-функцию *root*. Таким образом, для того чтобы найти зависимость  $y = y(x)$  при расчетах приходится прибегать к трем неявным итерациям, что связано, при количественном моделировании поставленной задачи, с заметной, но допустимой, затратой машинного времени.

На базе формул (15), (17), (22), (23) может быть реализован полный конструктивный анализ кинематики частицы в рабочей полости вертикального пневмосепарирующего канала электросепаратора.

Эффективность процесса разделения компонентов смеси по каждой из входящих в нее фаз зависит от величины так называемого критического диаметра  $d_{кр}$  некоторой гипотетической частицы, совершающей заданную условную траекторию в рабочем объеме криоэлектросепаратора. При этом согласно определению понятия критического диаметра  $d_{к}$  частицы, размером больше  $d_{к}$ , отводятся вниз, а размером меньшим  $d_{к}$  — уходят с потоком воздуха в относ. В свою очередь, если эффективность процесса сепарирования смеси базируется на понятии критической скорости витания  $w_{к}$  частицы, то частицы, движущиеся со скоростью меньшей критической, отводятся в зону целевого продукта, а движущиеся со скоростью больше критической — в относ.

Таким образом, критический диаметр определяется на основе решения относительно  $d_{кр}$  и  $\tau'$  (где  $\tau'$  — время осаждения частицы на заземленном электроде  $x = L$ ) системы двух полученных на базе (22), (23) трансцендентных уравнений

$$L = \int_0^{\tau'} V_x d\tau \quad (24)$$

$$U\tau' + (1/k) \ln [(c + 1) e^{a\tau'/2} / (c + e^{a\tau'})] = 0. \quad (25)$$

Поскольку решение данной задачи практически не реально по объему машинного времени, то критический диаметр  $d_{кр}$  определяют путем визуализации траекторий частиц на основе их количественного моделирования.

При анализе особенностей поведения частиц диспергированного сырья биологического происхождения, следует иметь в виду различие их физико-механических свойств.

Наряду с имеющим место значительным отклонением величин физико-механических параметров сырья биологического происхождения, в результате его измельчения образуются частицы, существенно отличающиеся по форме — от близкой к сферической до пластинчатой. Что от-

ражается в величине входящего в выражение силы  $F_c$  сопротивления движению частицы коэффициента сопротивления  $c_y$ . В дальнейшем с целью сопоставить результатов расчетов по количественному моделированию кинетики смеси, состоящей из исходных компонентов в криоэлектросепараторе будем предполагать, что все частицы смеси имеют сферическую форму с диаметром  $d$ . Причем, частицы сырья, по форме приближающиеся к сфере, будем характеризовать значением аэродинамического коэффициента сопротивления  $c_{ys} = 0,8$  (условно-тяжелый компонент смеси, целевой продукт), а частицы, сильно отличающиеся от сферы, значением  $c_{yl} = 1,2$  (условно-легкий компонент смеси, примеси). Что близко к имеющим место данным величинам в практических условиях [8]. Количественное моделирование по тяжелому и легкому компонентам смеси для характерных для исследуемого процесса значений параметров отражено на рис. 2, 3.

*Рассмотрим пример.* Пусть плотность частицы  $\rho_n = 1200 \text{ кг/м}^3$ ; плотность воздуха  $\rho_v = 1,3 \text{ кг/м}^3$ ; ширина канала  $L = 0,2 \text{ м}$ ; скорость потока воздуха  $U = 6 \text{ м/с}$ , напряженность электрического поля  $E = 2 \cdot 10^5 \text{ В/м}$ , скорость подачи смеси  $V_0 = 0,5 \text{ м/с}$ ; угол подачи смеси  $\varphi = -45^\circ$ . Требуется определить при заданных параметрах процесса критический диаметр замораживания тяжелой частицы. Поскольку она условно отнесена к условно-легкому компоненту смеси, то принимаем коэффициент сопротивления  $c_{yl} = 1,2$ . Сравнивая графики, показанные на рис. 3, заключаем, что наиболее близкое положение к критической траектории занимает кривая, соответствующая диаметру частицы  $d = 2 \text{ мм}$ . По-видимому, критический диаметр частицы лежит в интервале  $2 \text{ мм} < d_{кр} < 3 \text{ мм}$ . Это означает, что согласно расчету частицы кости размером больше  $3 \text{ мм}$  осядут, т. е. уйдут в зону целевого продукта.

Помимо этого из анализа графиков на рис. 3, относящихся к исследованию поведения тяжелых частиц (коэффициент сопротивления  $c_{ys} = 0,8$ ) крупностью  $d = 10^{-3} \text{ м}$ , видно, что сила тяжести частицы превалирует над силой сопротивления движущегося со скоростью  $U = 3 \text{ м/с}$  воздушного потока и поэтому частицы осаждаются (условно — в зону целевого продукта). Причем, вследствие меньшего воздействия электрического поля на частицу в направлении оси  $x$  (при  $E = 10^5 \text{ В/м}$ ) — по более крутой траектории, и более пологой — результате более интенсивного воздействия на частицу в том же направлении (при  $E = 2 \cdot 10^5 \text{ В/м}$ ). В свою очередь, сила сопротивления перемещающегося со скоростью  $U = 6 \text{ м/с}$  воздушного потока превышает силу тяжести, в результате чего частицы того же размера уходят в относ. (условно — в зону примесей) — по траекториям, имеющим те же особенности по крутизне в зависимости от интенсивности электрического поля.

Графики на рис. 3 показывают, что при скорости  $U = 6 \text{ м/с}$  воздушного потока частицы диаметром  $d = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  осаждаются в зону целевого продукта, а частицы меньшего диаметра  $d = 10^{-3} \text{ м}$  — уходят с потоком воздуха в относ. в зону примесей. Это обусловлено большей относительной «парусностью», как отношения миделевого сечения частиц к их весу, частиц меньшего размера, и следовательно, относительно большим значением силы сопротивления движению частицы

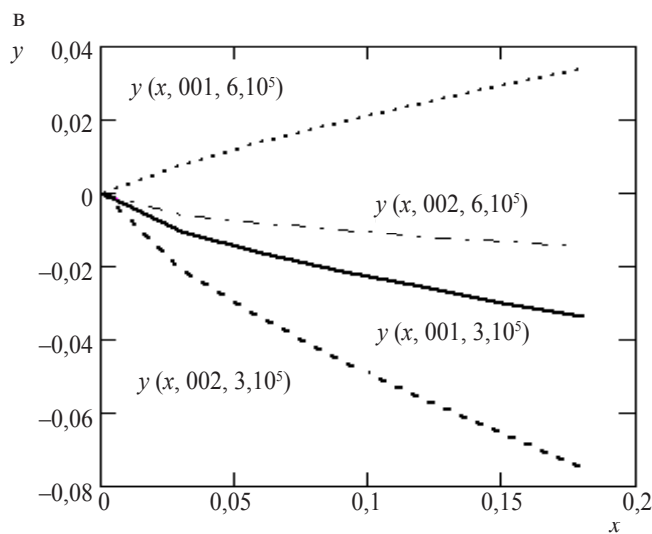
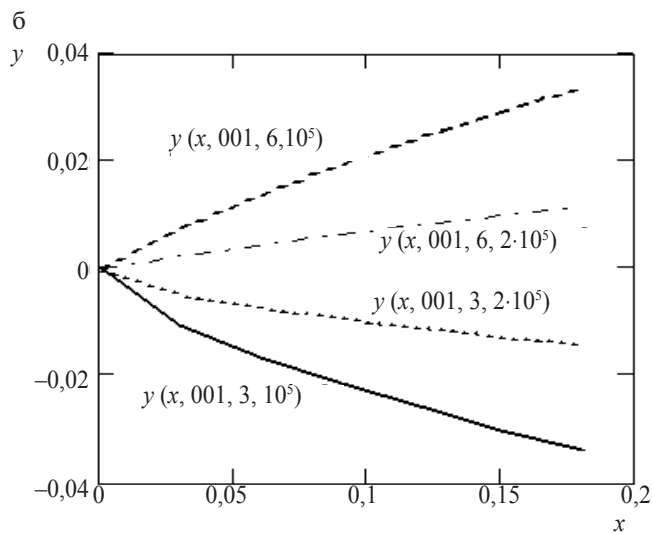
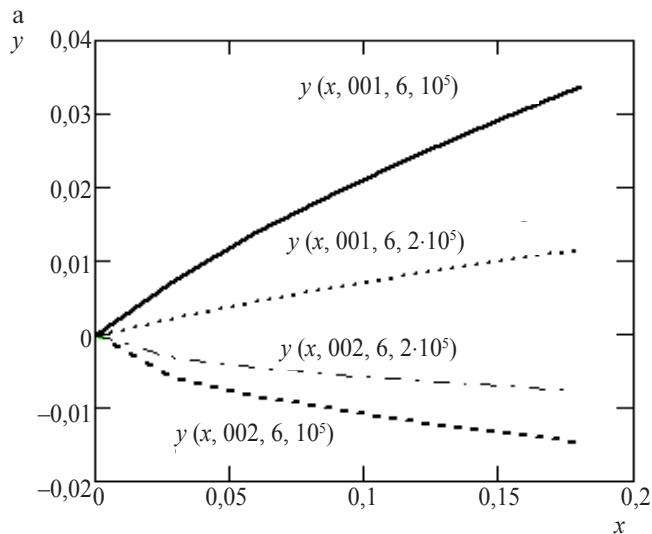


Рис. 2. Траектории движения частицы при ее плотности  $\rho_n = 1200 \text{ кг/м}^3$ , коэффициенте сопротивления  $c_y = 0,8$  (тяжелые частицы):  
 а —  $d = 1 \text{ мм}$ ; — — —  $U = 3 \text{ м/с}$ ,  $E = 10^5 \text{ В/м}$ ;  
 ..... —  $U = 3 \text{ м/с}$ ,  $E = 2 \cdot 10^5 \text{ В/м}$ ; - - - —  $U = 6 \text{ м/с}$ ,  $E = 10^5 \text{ В/м}$ ;  
 ..... —  $U = 6 \text{ м/с}$ ,  $E = 2 \cdot 10^5 \text{ В/м}$ ;  
 б —  $U = 6 \text{ м/с}$ ; — — —  $d = 1 \text{ мм}$ ,  $E = 10^5 \text{ В/м}$ ;  
 ..... —  $d = 1 \text{ мм}$ ,  $E = 2 \cdot 10^5 \text{ В/м}$ ; - - - —  $d = 2 \text{ мм}$ ,  $E = 10^5 \text{ В/м}$ ;  
 ..... —  $d = 2 \text{ мм}$ ,  $E = 2 \cdot 10^5 \text{ В/м}$ ;  
 в —  $E = 10^5 \text{ В/м}$ ; — — —  $d = 1 \text{ мм}$ ,  $U = 3 \text{ м/с}$ ;  
 ..... —  $d = 1 \text{ мм}$ ,  $U = 6 \text{ м/с}$ ; - - - —  $d = 2 \text{ мм}$ ,  $U = 3 \text{ м/с}$ ;  
 ..... —  $d = 2 \text{ мм}$ ,  $U = 6 \text{ м/с}$

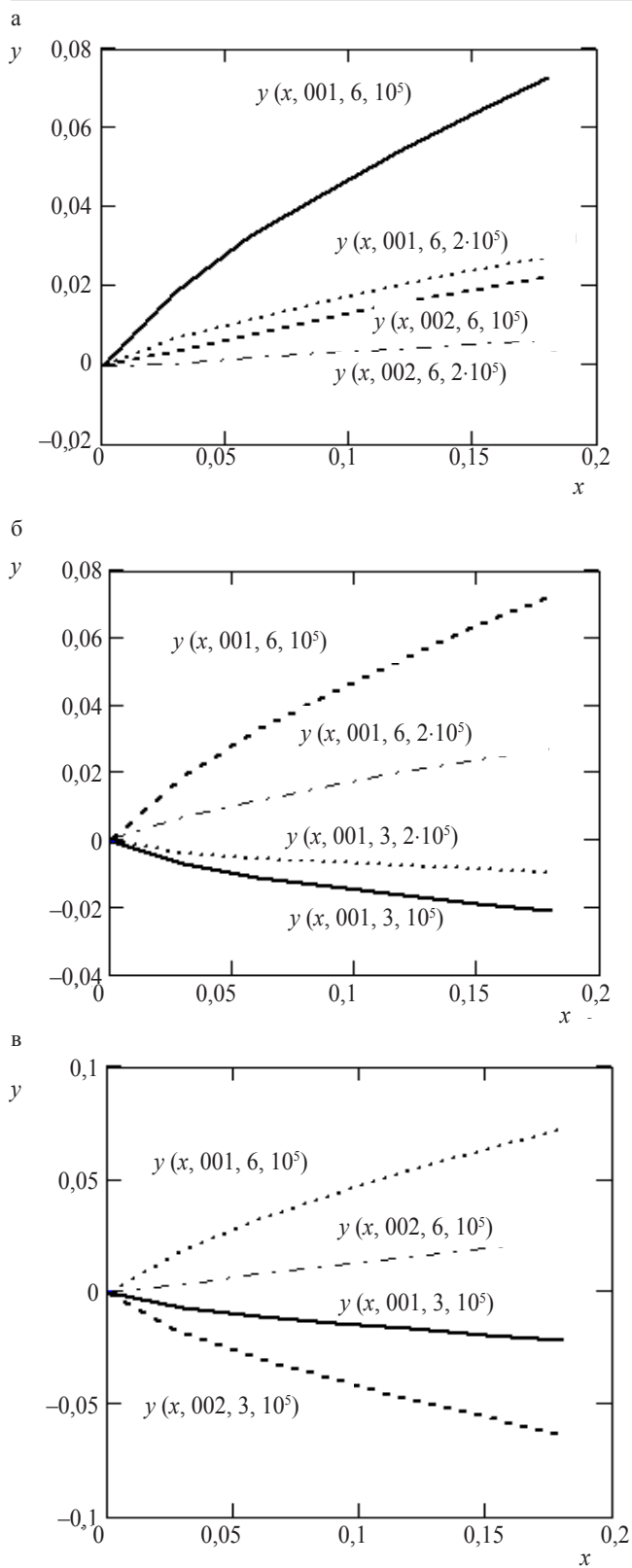


Рис. 3. Траектории движения частицы при ее плотности  $\rho_1 = 1200 \text{ кг/м}^3$ , коэффициенте сопротивления  $c_s = 1,2$  (легкие частицы):  
 а —  $d = 1 \text{ мм}$ ; — — —  $U = 3 \text{ м/с}$ ,  $E = 10^5 \text{ В/м}$ ;  
 ..... —  $U = 3 \text{ м/с}$ ,  $E = 2 \cdot 10^5 \text{ В/м}$ ; - - - —  $U = 6 \text{ м/с}$ ,  
 $E = 10^5 \text{ В/м}$ ; - · - · - —  $U = 6 \text{ м/с}$ ,  $E = 2 \cdot 10^5 \text{ В/м}$ ;  
 б —  $U = 6 \text{ м/с}$ ; — — —  $d = 1 \text{ мм}$ ,  $E = 10^5 \text{ В/м}$ ; ..... —  $d = 1 \text{ мм}$ ,  
 $E = 2 \cdot 10^5 \text{ В/м}$ ; - - - —  $d = 2 \text{ мм}$ ,  $E = 10^5 \text{ В/м}$ ;  
 - · - · - —  $d = 2 \text{ мм}$ ,  $E = 2 \cdot 10^5 \text{ В/м}$ ;  
 в —  $E = 10^5 \text{ В/м}$ ; — — —  $d = 1 \text{ мм}$ ,  $U = 3 \text{ м/с}$ ;  
 ..... —  $d = 1 \text{ мм}$ ,  $U = 6 \text{ м/с}$ ; - - - —  $d = 2 \text{ мм}$ ,  $U = 3 \text{ м/с}$ ;  
 - · - · - —  $d = 2 \text{ мм}$ ,  $U = 6 \text{ м/с}$

со стороны воздушного потока. При этом характер кривизны траекторий в зависимости от напряженности электрического поля такой же, как и по рис. 2, а.

По виду кривых на рис. 3, в, можно заключить, что в условиях постоянной напряженности  $E = 10^5 \text{ В/м}$  электрического поля в рабочем объеме сепаратора в движущемся со скоростью  $U = 3 \text{ м/с}$  воздушном потоке частицы крупностью  $d = 10^{-3} \text{ м}$  опускаются (уходят в зону целевого продукта), а в движущемся с большей скоростью  $U = 6 \text{ м/с}$  потоке воздуха частицы того же размера поднимаются — уходят в зону примесей. В то время как более крупные частицы диаметром  $d = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  в расчетном диапазоне изменения скоростей движения воздуха

$U = 3 \div 6 \text{ м/с}$  — опускаются.

Все частицы, отмеченные по количественному анализу особенностей кинематики частиц в рабочем объеме пневмокриоэлектросепаратора, находятся в соответствии с физическим смыслом исследуемого процесса.

## Выводы

1. На основе анализа кинетики изолированной заряженной частицы, перемещающейся под действием электростатического поля постоянной напряженности с учетом кинетики зарядки частиц и силы тяжести в восходящем воздушном потоке, получены расчетные зависимости по кинематическим характеристикам движения частицы;

2. На базе геометрических и физико-механических параметров процесса сепарирования, в зависимости от показателя аэродинамического сопротивления, по найденным кинематическим характеристикам движения заряженной частицы в силовых полях различной структуры, проведено количественное моделирование данных характеристик с целью обоснования критической траектории и критического диаметра частицы.

## Список литературы

1. Верещагин В. П. Основы электрогазодинамики дисперсных систем/В. П. Верещагин, В. И. Левитов, Г. З. Мирзабекян, М. М. Пашин. — М.: Энергия, 1974.
2. Рогов И. А. Криосепарация сырья биологического происхождения/И. А. Рогов, Б. С. Бабакин, Ю. А. Фатыхов. — Рязань: Наше время, 2005.
3. Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами/Р. Бусройд. — М.: Мир, 1975.
4. Страус В. Промышленная очистка газов/В. Страус. — М.: Химия, 1981.
5. Коузов П. А. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности/П. А. Коузов, А. Д. Малыгин, Г. М. Скрябин. — Л.: Химия, 1982.
6. Идельчик И. Е. Аэродинамика технологических аппаратов/И. Е. Идельчик. — М.: Машиностроение, 1983.
7. Кудрявцев Е. М. MATCHAD 2000/Е. М. Кудрявцев. — М., 2001.
8. Дейли Дж. Механика жидкости/Дж. Дейли, Д. Харлеман. — М.: Энергия, 1971.