

МОДЕЛЬ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОМ (КАБДИН Н.Е., БЕЛОВ М.И., СЕЛЕЗНЕВА Д.М.)

Двухзонный электростатический фильтр (ЭФ) предназначен для очистки воздуха от пыли путем зарядки и улавливания частиц пыли в двух зонах: зоне зарядки (ионизаторе) и зоне осаждения (осадителе) [1], [2], [3].

Воздушный поток, нагнетаемый осевым вентилятором, захватывает частицы пыли и направляет их в ионизатор. В ионизаторе частицы пыли приобретают заряд, двигаясь в электрическом поле между коронирующим и заземленным коллекторным электродами [4]. При этом некоторые частицы пыли осаждаются на пластине коллекторного электрода. Частицы пыли, заряженные в ионизаторе, потоком воздуха направляются в зону осаждения, двигаясь в секциях между пластиной электрода под напряжением и параллельной пластиной коллекторного заземленного электрода. ЭФ улавливает частицу пыли, если при движении ее между электродами траектория частицы пересекает пластину коллекторного электрода в зоне ионизации или осаждения [5], [6].

Исследуемый объект – частица пыли, движущаяся в электростатическом фильтре (ЭФ). Предмет исследования – движение заряженной частицы пыли в зонах ионизации и осаждения ЭФ. Целью исследования является повышение эффективности очистки воздуха от пыли и других аэрозолей при использовании двухзонного ЭФ.

Задачи исследования состоят в следующем:

- 1) разработка математической модели движения частицы пыли в зонах ионизации и осаждения ЭФ;
- 2) обоснование показателей эффективности очистки воздуха от пыли;
- 3) исследование влияния потенциала коронирующего электрода на максимальную и среднюю напряженность электрического поля в зоне ионизации и зарядку частиц;

4) исследование влияния количества зон осаждения на показатели эффективности очистки воздуха;

5) исследование влияния скорости воздушного потока на показатели эффективности очистки воздуха;

6) исследование влияния многократного прохода воздуха через электрофильтр на показатели эффективности очистки воздуха.

Можно отметить два направления исследования движения аэрозольных частиц в зонах ионизации и осаждения: «детерминированный» и «вероятностный». В первом случае заряженная частица представляется сферой и определяется ее дрейф между электродами в зоне осаждения при действии на частицу механических и электрических сил [7], [8], [9]. Во втором случае наряду с динамической рассматривается вероятностная модель движения частицы, в которой учитываются соударения частиц между собой. Вероятностная модель эффективна при моделировании турбулентных потоков. Однако, можно считать, что аэрозольные частицы практически не сталкиваются между собой, если вентилятор ЭФ обеспечивает ламинарный воздушный поток [10]. Поэтому при постановке задачи соударения заряженных частиц пыли между собой принято не рассматривать. Ввиду неопределенности начального положения и размера частицы в момент входа в зону ионизации начальное положение и размер частицы рассматривались как независимые случайные величины. Таким образом, задача о движении заряженной частицы пыли заданного размера между электродами двузонного ЭФ представляет вторую задачу динамики точки со случайными начальными условиями. Предполагалось, что при входе в зону ионизации положение частицы между электродами (расстояние от пластины коллекторного электрода до частицы) подчиняется равномерному закону распределения [11], [12]. При этом эффективность очистки воздуха от пыли определялась по статистике решений второй задачи динамики точки, в которых траектория частицы пересекает пластину коллекторного электрода.

Приняты следующие допущения:

- 1) частица пыли – твердое тело сферической формы;
- 2) скорость частицы воздушного потока в каждой точке проходного сечения между электродами постоянна и направлена перпендикулярно проволочным коронирующим электродам и параллельно пластинам коллекторных электродов;
- 3) влиянием веса частицы пыли на движение ее в воздушном потоке можно пренебречь [13];
- 4) движением заряженной частицы в направлении, параллельном пластинам электродов и перпендикулярном направлению потока воздуха, можно пренебречь;
- 5) влиянием электрического ветра коронирующего разряда на эффективность ЭФ можно пренебречь [14].

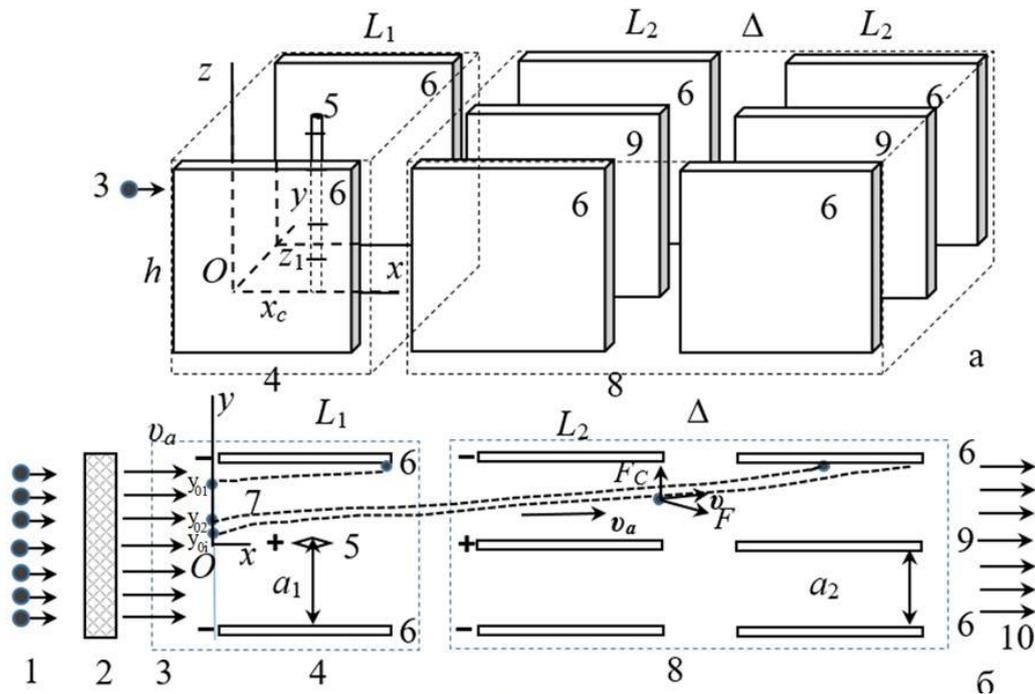


Рисунок 1. – Электростатический фильтр (а) и движение частиц пыли между электродами в секции зоны ионизации и секциях двух зон осаждения (б). 1, 3 – входной воздушный поток с пылью; 2 – предварительный фильтр для улавливания крупноразмерной пыли; 4 – зона ионизации; 5 – коронирующий игольчатый электрод; 6 – пластина коллекторного заземленного электрода; 7 – траектории частицы пыли; 8 – зоны осаждения; 9 – пластина электрода под напряжением; 10 – выходной воздушный поток

Обозначения (Рисунок 1):

t – время, с;

$Oxyz$ – прямоугольная система декартовых координат с осью Ox , проходящей через конец коронирующего электрода и направленной перпендикулярно коронирующим электродам и параллельно пластинам коллекторных электродов, осью Oy , перпендикулярной пластинам коллекторных электродов, и осью Oz , параллельной коронирующим электродам;

x, y – координаты частицы пыли (центра масс пылинки), м;

y_0 – координата частицы пыли по оси Oy при входе в секцию зоны ионизации, м;

L_1, L_2 – длина коллекторной пластины в зоне ионизации и зоне осаждения соответственно, м;

x_c – расстояние между осью Oz и коронирующим электродом ($x_c = L_1/2$), м;

h – высота коронирующего электрода и пластин коллекторных электродов, м;

a_1 – расстояние между коронирующим и коллекторным электродами в зоне ионизации, м;

a_2 – расстояние между электродом под напряжением и коллекторным электродом в зоне осаждения, м;

D – диаметр сферической частицы пыли, м;

n_b – число частиц пыли диаметром D ;

n_L – число зон осаждения;

v_a, v_{ax}, v_{ay} – величина и соответственно координаты по осям Ox , Oy скорости частицы воздушного потока, м/с;

v_x, v_y – координаты по осям Ox, Oy скорости частицы пыли, м/с;

q – заряд частицы пыли, Кл;

q_k – заряд коронирующего электрода, Кл;

q_c – заряд пластины электрода в зоне осаждения, Кл;

- R – радиус цилиндрического провода коронирующего электрода, м;
- e – элементарный заряд, $e = 1.602 \cdot 10^{-19}$ Кл;
- T – температура воздуха по абсолютной шкале Кельвина, $T = 293$ К;
- k – постоянная Больцмана, $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;
- N_0 – средняя концентрация ионов в воздухе, $N_0 = 5 \cdot 10^{14}$ 1/м³;
- v_c – среднеквадратическая скорость ионов, $v_c = 239$ м/с ;
- v_z – подвижность ионов воздуха, $v_z = 1.4 \cdot 10^{-4}$ (м/с)/(В/м);
- E_i, E_{ix}, E_{iy} – величина и соответственно координаты по осям Ox, Oy вектора напряженности электрического поля, В/м;
- U_K – потенциал коронирующего электрода, В;
- U_c – потенциал пластины электрода под напряжением в зоне осаждения, В;
- E_K – максимальная напряженность в зоне ионизации, В/м;
- E_C – средняя напряженность в зоне ионизации, В/м;
- C_C – коэффициент Милликена;
- μ – коэффициент динамической вязкости воздуха, Па с;
- ρ_a – плотность воздуха, $\rho_a = 1.2$ кг/м³;
- ρ – плотность частицы пыли, $\rho = 1000$ кг/м³;
- ϵ_0 – электрическая постоянная, единица емкости, $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Кл²/(Н·м²);
- ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость частицы пыли, $\epsilon = 3$;
- F_{sx}, F_{sy} – координаты по осям Ox, Oy силы Стокса, действующей на частицу пыли со стороны воздушного потока, Н;
- F_{kx}, F_{ky} – координаты по осям Ox, Oy силы Кулона, действующей на заряженную частицу пыли, Н;
- Q_b – производительность вентилятора электрофильтра, м³/с;
- P_D – показатель очистки воздуха при однократном проходе через электрофильтр;
- P_D – показатель очистки воздуха при однократном проходе через электрофильтр;

P_{DT} – показатель очистки воздуха при многократном проходе через электрофильтр;

T, T_1 – время работы электрофильтра и время, за которое через электрофильтр проходит воздух в помещении некоторого объема, с.

Взаимодействие частицы с воздушным потоком

Между силой, действующей на частицу, и гидродинамическим давлением на нее со стороны жидкости (газа) при направленном движении частицы и газа имеет место такая связь:

$$F = c_D \rho (v_a - v)^2 \pi D^2 / 8;$$

Коэффициент сопротивления c_D в данной формуле зависит от числа Рейнольдса

$$\Re = (v_a - v) \rho D / \mu;$$

В диапазоне $Re < 0,2$ сила, действующая на частицу со стороны газа, существенно зависит от вязкости газа, и формула записывается как закон Стокса:

$$F = 3\pi \mu D (v_a - v);$$

Когда размеры частиц становятся соизмеримыми с размерами молекул газа, эффект вязкости, лежащий в основе закона Стокса, снижается. Для сферических частиц пыли диаметром D не более 1 мкм закон Стокса записывается с поправкой Каннингема:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{Sx} = \frac{3\pi\mu D \left(v_{ax} - \frac{dx}{dt} \right)}{C_c} \\ F_{Sy} = \frac{3\pi\mu D \left(v_{ay} - \frac{dy}{dt} \right)}{C_c} \end{array} \right. ; \quad (1)$$

где C_c – коэффициент Милликена, определяемый при средней длине свободного пробега молекул воздушного потока, равной 0,07 мкм, и

измерении D в мкм, по формуле:

$$C_c = 1 + \frac{0,14}{D} \zeta;$$

В том случае, когда движения частицы и воздушного потока не однонаправленны, величины v_a , v , F в формуле (1) следует рассматривать как векторы.

Выделим две фазы движения заряженной частицы. На первой фазе будем рассматривать движение частицы в секции зоны ионизации между проволочным коронирующим электродом и пластиной коллекторного электрода. На второй фазе – движение в секции зоны осаждения между пластиной отталкивающего электрода под напряжением положительной полярности и пластиной заземленного коллекторного электрода.

Движение частицы в секции зоны ионизации

Найдем силы, действующие на заряженную частицу в точке M с координатами x , y в секции ионизатора (Рисунок 2). В соответствии с допущением 4 будем считать, что проекции сил на ось Oz можно не рассматривать.

Поместим в точку M пробный положительный единичный заряд.

Пусть r_1 – расстояние от точки M до коронирующего электрода; r_2 – расстояние от точки M до элемента коронирующего электрода элементарной длины dz_1 на расстоянии z_1 от плоскости Oxy ; dE – элементарная напряженность в точке M электрического поля заряда элемента коронирующего электрода; E_1 – величина проекции вектора напряженности электрического поля в точке M , создаваемого одиночным коронирующим электродом, на плоскость Oxy (Рисунок 2а).

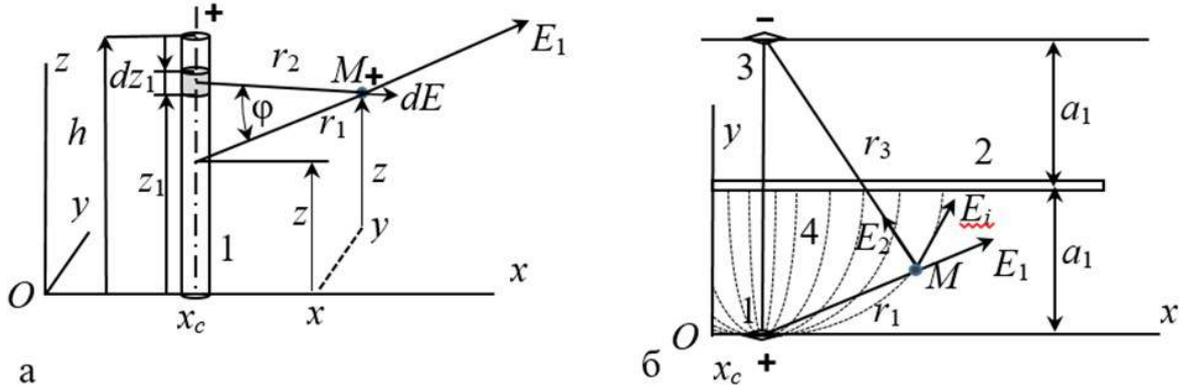


Рисунок 2. – К расчету напряженности электрического поля от коронирующего электрода (а) и между коронирующим электродом и пластиной коллекторного электрода (б)

1 – коронирующий проволочный электрод с положительным зарядом; 2 – пластина коллекторного электрода; 3 – фиктивный проволочный электрод с отрицательным зарядом; 4 – силовые линии электрического поля

По определению [15],

$$r_1 = \left[(x - x_c)^2 + y^2 \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (2)$$

$$r_2^2 = r_1^2 + (z_1 - z)^2;$$

$$dE = (q_k/h) dz_1 / (4\pi \epsilon_0 r_2^2);$$

$$E_1 = \int_0^h \frac{r_1}{r_2} dE = \frac{q_k r_1}{4\pi \epsilon_0 h} \int_0^h \frac{1}{r_2^3} dz_1;$$

Последнее равенство с учетом выражения для r_2 перепишем так:

$$E_1 = \frac{q_k}{4\pi \epsilon_0 h r_1} \left\{ z \left(z^2 + r_1^2 \right)^{-\frac{1}{2}} + (h - z) \left[(h - z)^2 + r_1^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \right\};$$

В соответствии с допущением 4 будем рассматривать среднюю по координате z напряженность как функцию от x, y в таком виде:

$$E_1 = \frac{q_k}{4\pi \epsilon_0 h r_1} \frac{1}{h} \int_0^h \left\{ z \left(z^2 + r_1^2 \right)^{-\frac{1}{2}} + (h - z) \left[(h - z)^2 + r_1^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \right\} dz;$$

или

$$E_1 = \frac{q_k}{4\pi \varepsilon_0 h r_1} \frac{2(h^2 + r_1^2)^{\frac{1}{2}} - 2r_1}{h}; \quad (3)$$

В электрическом поле заряда коронирующего электрода на заземленной пластине коллекторного электрода индуцируется отрицательный заряд. Для учета электрического поля индуцированного заряда воспользуемся методом зеркальных отображений [15]: к полю заряда коронирующего электрода добавляется поле «фиктивного» коронирующего электрода с равным по величине отрицательным зарядом, расположенного симметрично относительно пластины коллекторного электрода (Рисунок 2б). Величину напряженности E_2 в точке M поля, создаваемого зарядом «фиктивного» электрода, можно определить по формуле (3) с изменением величины r_1 :

$$E_2 = \frac{q_k}{4\pi \varepsilon_0 h r_3} \frac{2(h^2 + r_3^2)^{\frac{1}{2}} - 2r_3}{h}; \quad (4)$$

где r_3 – расстояние от точки M до фиктивного коронирующего электрода

$$r_3 = \left[(x - x_c)^2 + (2a_1 - y)^2 \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (5)$$

Координаты вектора напряженности электрического поля в точке M ионизатора по осям Ox , Oy найдем как суммы соответствующих координат напряженностей величиной E_1 и E_2 :

$$E_{ix} = E_{1x} + E_{2x}; \quad E_{iy} = E_{1y} + E_{2y}; \quad (6)$$

$$E_{1x} = E_1 (x - x_c) r_1^{-1}; \quad E_{1y} = E_1 y r_1^{-1};$$

$$E_{2x} = -E_2 (x - x_c) r_3^{-1}; \quad E_{2y} = E_2 (2a_1 - y) r_3^{-1};$$

Можно убедиться, что поле напряженности в плоскости Oxy и параллельных плоскостях потенциальное.

Найдем заряд q_k коронирующего электрода для расчета

напряженности его электрического поля по формуле (6). Заряд распределен равномерно по поверхности электрода, включая боковые иглы. Рассмотрим силовую линию (отрезок) поля, перпендикулярную заземленной пластине, с одним концом на проводе с координатами x_C, R и вторым концом на пластине с координатами $x_C, R + a_1$ по осям Ox, Oy . Как следует из формулы (6), координаты напряженности поля по оси Ox в точках этой линии равны нулю:

$$E_{1x} = E_{2x} = 0;$$

Потенциалы поля в концевых точках линии равны соответственно U_K и 0. По определению,

$$0 - U_K = - \int_R^{a_1} (E_{1y} + E_{2y}) dy;$$

или с учетом равенств (4), (5) и (3), (6) при $x = x_C$

$$U_K = \frac{q_k}{2\pi \varepsilon_0 h^2} \int_R^{a_1} \left(\frac{(h^2 + y^2)^{\frac{1}{2}} - y}{y} + \frac{(h^2 + (2a_1 - y)^2)^{\frac{1}{2}} - (2a_1 - y)}{2a_1 - y} \right) dy;$$

По условиям, $y < a_1 \ll h$ и, пренебрегая y и $(2a_1 - y)$ в сравнении с h , представим последнее равенство в таком виде:

$$U_K = \frac{q_k}{2\pi \varepsilon_0 h} \ln \frac{2a_1 - R}{R};$$

Таким образом, если потенциал и радиус R провода коронирующего электрода заданы, заряд коронирующего электрода можно оценить по формуле:

$$q_k = U_K 2\pi \varepsilon_0 h / \ln \frac{2a_1 - R}{R}; \quad (7)$$

Пусть на границе коронирующего электрода, где $x = x_C, y = R, r_1 = R, r_3 \approx 2a_1$, напряженность E_i известна и равна E_K . Тогда из равенств (6) и (2)..(5) следует, что $E_{1x} = E_{2x} = 0; E_{1y} = E_1; E_{2y} = E_2$.

При этом

$$E_K = E_1 + E_2;$$

или, учитывая равенство (7),

$$E_K = U_K \left\{ \frac{(h^2 + R^2)^{\frac{1}{2}} - R}{R} + \frac{[h^2 + (2a_1 - R)^2]^{\frac{1}{2}} - 2a_1 + R}{2a_1 - R} \right\} / \left(h \ln \frac{2a_1 - R}{R} \right); \quad (8)$$

и приближенно

$$E_K = U_K / \left(R \ln \frac{2a_1 - R}{R} \right);$$

Координаты силы Кулона, действующей на заряженную частицу, прямо пропорциональны координатам напряженности электрического поля и заряду частицы пыли:

$$F_{Kx} = q E_{ix}; \quad F_{Ky} = q E_{iy}; \quad (9)$$

Как следует из выражений (9), для определения силы Кулона необходимо оценить заряд частицы пыли в электростатическом поле коронного разряда. Рассмотрим частицы пыли, размеры которых варьируют от 0,1 мкм до 1 мкм. Зарядка частиц осуществляется при их соударениях с ионами, образуемыми при коронном разряде [16]. Частицы размером 1 мкм и выше соударяются с ионами, движущимися упорядоченно под действием сил электрического поля. Частицы размером 0,2 мкм и ниже соударяются с ионами, движущимися хаотично в процессе теплового движения. При рассмотрении частиц в диапазоне от 0,2 мкм до 1 мкм необходимо учитывать оба способа движения ионов. Заряд частицы при диффузионной зарядке ионами, движущимися хаотично, при относительной диэлектрической проницаемости воздуха, равной единице, определяется по следующей формуле [17]:

$$q = 2\pi \varepsilon_0 \frac{DkT}{e} \ln \left(1 + \frac{Dv_c N_0 e^2}{8\varepsilon_0 kT} t \right); \quad (10)$$

Заряд частицы пыли униполярными ионами воздуха, движущимися упорядоченно в электростатическом поле, определяется по такой формуле:

$$q = 3\pi\varepsilon_0 \frac{\varepsilon}{\varepsilon + 2} E_c D^2 \frac{N_0 e v_z t}{N_0 e v_z t + 4\varepsilon_0}; \quad (11)$$

В соответствии с формулой (11) заряд частицы возрастает до некоторой предельной величины. При этом частица получит 95% максимального заряда за время 0,03 с и 90% – за время 0,013 с. Это означает, что при скорости воздушного потока до 0,92 м/с частица пыли получит 90% максимального заряда и более при длине зоны ионизации 12 мм. Формула (11) справедлива для электрического поля постоянной напряженности. Примем, что такой напряженностью можно считать среднюю напряженность электрического поля на участке ионизатора длиной L_1 , равной 12 мм. При увеличении длины пластин ионизатора напряженность на участке длиной 12 мм при расположении коронирующего электрода в центре участка остается без изменений, так как в соответствии с формулами (6) напряженность не зависит от L_1 .

По определению, величина напряженности электрического поля в некоторой точке зоны ионизации представляется функцией координат x , y , z точки. Средняя напряженность E_c , по определению, есть некоторая средняя величина напряженностей в точках траектории частицы за время ее движения в зоне ионизации. Очевидно, чем дальше от коронирующего электрода движется частица, тем меньше величины напряженности в точках ее траектории. Усредненная по координате z величина напряженности в точках секции зоны ионизации с координатами x , y зависит от координат и определяется с помощью формул (6). Чтобы найти постоянную величину напряженности, пригодную для использования в формуле (11), положим, что изменение координаты y частицы после входа в зону ионизации влияет незначительно на усредненную по координате x величину напряженности. Таким образом, при заданной координате y точки входа частицы в секцию зоны ионизации величину средней напряженности E_c , остающуюся постоянной за время движения частицы в этой зоне, можно найти так:

$$E_c = (E_{cx}^2 + E_{cy}^2)^{1/2}; \quad (12)$$

где E_{cx} , E_{cy} вычисляются как усредненные по координате x величины E_{ix} , E_{iy} , определенные по формулам (6), а именно

$$E_{cx} = \frac{2}{L_1} \int_0^{L_1/2} (E_{1x} + E_{2x}) dx; \quad E_{cy} = \frac{2}{L_1} \int_0^{L_1/2} (E_{1y} + E_{2y}) dx;$$

или при $u = (2a_1 - y)$; $y > R$: $L_1 = 0.012$ м при допущении $r_1 \ll h$; $r_3 \ll h$

$$E_{cx} = \frac{q_k}{2\pi\epsilon_0 h L_1} \ln \frac{y^2(L_1^2/4 + u^2)}{u^2(L_1^2/4 + y^2)}; \quad E_{cy} = \frac{q_k}{\pi\epsilon_0 h L_1} \left(\arctan \frac{L_1}{2y} + \arctan \frac{L_1}{2u} \right); \quad (13)$$

При выводе формул (13) полагалось, что коронирующий электрод помещен в середину зоны ($x_c = L_1/2$), и напряженность электрического поля между коронирующим электродом и ближайшей заземленной пластиной симметрична относительно плоскости $x = L_1/2$.

В соответствии с допущениями 3, 4, 5 на частицу пыли действуют две значимые силы: активная сила Кулона (равнодействующая сил Кулона), направленная вдоль силовых линий электрического поля, и реактивная сила Стокса, направленная противоположно скорости частицы в движении относительно воздушного потока (Рисунок 3).

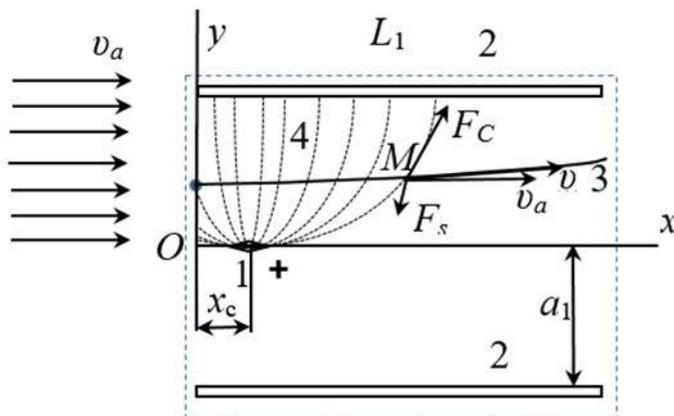


Рисунок 3. – Силы, действующие на заряженную частицу M в секции зоны ионизации. 1 – коронирующий игольчатый электрод; 2 – пластина коллекторного электрода; 3 – траектория частицы M ; 4 – силовые линии электрического поля

Учитывая формулы (1), (9), дифференциальные уравнения движения

частицы под действием сил Кулона и Стокса в плоскости Oxy секции зоны ионизации запишем так:

$$\begin{cases} \rho \frac{\pi D^3}{6} \frac{d^2 x}{dt^2} = q E_{ix} + \frac{3\mu\pi D}{C_c} \left(v_{ax} - \frac{dx}{dt} \right) \\ \rho \frac{\pi D^3}{6} \frac{d^2 y}{dt^2} = q E_{iy} + \frac{3\mu\pi D}{C_c} \left(v_{ay} - \frac{dy}{dt} \right); \end{cases} \quad (14)$$

Уравнения (12) позволяют найти координаты частицы пыли в каждый момент, если задать начальные условия: координаты частицы x_0, y_0 в нулевой момент и координаты скорости частицы v_{ax}, v_{ay} , равные координатам вектора скорости частицы воздуха в нулевой момент,

$$\begin{cases} x=0; y=y_0 \\ \frac{dx}{dt} = v_{ax}; \frac{dy}{dt} = v_{ay}; \end{cases} \quad (15)$$

В уравнениях (14) заряд q в каждый момент рассчитывался как сумма зарядов, определенных по формулам (10) и (11) при диаметре частицы пыли в пределах от $0.1 \cdot 10^{-6}$ до $1.0 \cdot 10^{-6}$ м.

Движение частицы в секции зоны осаждения

Рассмотрим движение заряженной частицы пыли в секции зоны осаждения между электродами. Выберем систему декартовых прямоугольных координат $Oxyz$ с началом O в угловой точке пластины электрода под напряжением так, чтобы ось Oy была перпендикулярна пластине (Рисунок 4).

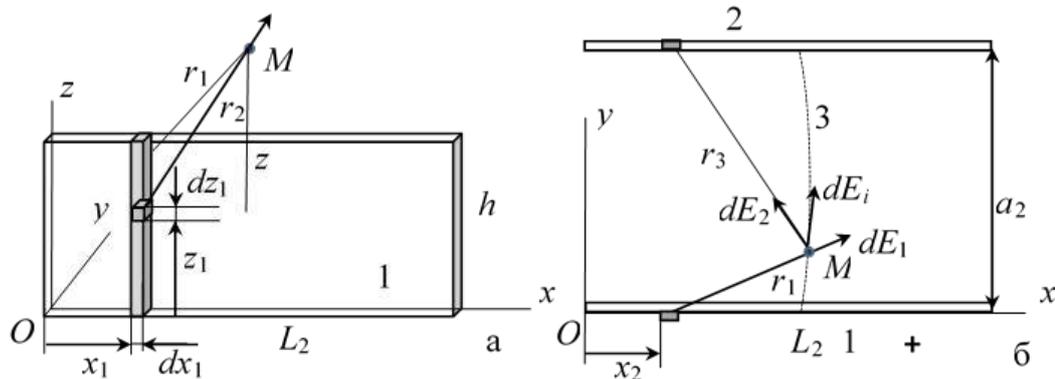


Рисунок 4. – Секция зоны осаждения с заряженной частицей M между

электродами. 1 – пластина электрода под напряжением; 2 – пластина коллекторного электрода; 3 – силовая линия электрического поля

Найдем выражения сил, действующих на заряженную частицу пыли в зоне осаждения. Для оценки силы Кулона определим координаты вектора напряженности электрического поля в точке M по осям Ox , Oy . Поместим в точку M с координатами x, y, z пробный положительный единичный заряд. Будем считать, что положительный заряд q_c пластины электрода под напряжением распределен равномерно по внутренней поверхности с плотностью $q_c/(h \cdot L_2)$. Выделим на внутренней поверхности пластины электрода элементарную площадку в виде прямоугольника высотой h и стороной элементарной длины dx_1 на расстоянии x_1 от начала координат вдоль оси Ox (Рисунок 4а). Внутри этого прямоугольника выделим элементарный прямоугольник на расстоянии z_1 от плоскости Oxy элементарной высоты dz_1 по оси Oz , который будем рассматривать как элемент пластины с элементарным положительным зарядом $q_c \cdot dx_1 \cdot dz_1 / (h \cdot L_2)$.

Пусть r_1 – расстояние от точки M до элементарного прямоугольника высотой h ; r_2 – расстояние от точки M до элемента пластины с координатами x_1, z_1 по осям Ox, Oz ; dE – элементарная напряженность в точке M электрического поля от заряда элемента пластины; dE_1 – проекция элементарной напряженности в точке M электрического поля заряда элемента пластины на плоскость Oxy . По определению,

$$r_1 = \left[(x - x_1)^2 + y^2 \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (16)$$

$$r_2^2 = r_1^2 + (z_1 - z)^2;$$

$$dE = \frac{q_c}{h L_2} \frac{1}{4\pi \varepsilon_0 r_2^2} dz_1 dx_1;$$

$$dE_1 = \frac{q_c}{h L_2} \frac{1}{4\pi \varepsilon_0 r_2^2} \frac{r_1}{r_2} dz_1 dx_1;$$

Проекции dE_{1x} , dE_{1y} элементарной напряженности в точке M

электрического поля от заряда элемента пластины на оси Ox , Oy можно представить такими выражениями:

$$dE_{1x} = \frac{q_c}{hL_2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r_2^2} \frac{r_1}{r_2} \frac{x-x_1}{r_1} dz_1 dx_1;$$

$$dE_{1y} = \frac{q_c}{hL_2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r_2^2} \frac{r_1}{r_2} \frac{y}{r_1} dz_1 dx_1;$$

Последние два равенства следует рассматривать как формулы для координат по осям Ox и Oy элементарной напряженности в точке M с координатами x, y, z в электрическом поле элемента пластины электрода с координатами $x_1, 0, z_1$. Отсюда можно найти координаты вектора напряженности в точке M по осям Ox и Oy в электрическом поле пластины электрода под напряжением ($y \neq 0$)

$$E_{1x} = \frac{q_c}{hL_2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_0^{L_2} (x-x_1) \left(\int_0^h \frac{1}{r_2^3} dz_1 \right) dx_1;$$

$$E_{1y} = \frac{q_c}{hL_2} \frac{y}{4\pi\epsilon_0} \int_0^{L_2} \left(\int_0^h \frac{1}{r_2^3} dz_1 \right) dx_1;$$

или

$$E_{1x} = \frac{q_c}{hL_2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_0^{L_2} \frac{(x-x_1)}{r_1^2} f(z, r_1) dx_1; \quad (17)$$

$$E_{1y} = \frac{q_c}{hL_2} \frac{y}{4\pi\epsilon_0} \int_0^{L_2} \frac{1}{r_1^2} f(z, r_1) dx_1; \quad (18)$$

где

$$f(z, r_1) = z \left(z^2 + r_1^2 \right)^{-\frac{1}{2}} + (h-z) \left[(h-z)^2 + r_1^2 \right]^{-\frac{1}{2}};$$

В соответствии с допущением 4 движение частицы вдоль оси Oz оказывает существенное влияние на эффективность ЭФ. Поэтому вместо последней функции рассмотрим ее усреднение $F(r_1)$ по переменной z :

$$F(r_1) = f(h/2, r_1);$$

или

$$F(r_1) = h(h^2/4 + r_1^2)^{-1/2};$$

и при $r_1 \ll h$

$$F(r_1) = 2;$$

Подставляя в равенства (17), (18) вместо функции $f(z, r_1)$ усредненную по переменной z функцию $F(r_1)$, получим следующие выражения координат вектора напряженности в точке M по осям Ox и Oy в электрическом поле пластины электрода под напряжением:

$$E_{1x} = \frac{q_c}{2\pi\epsilon_0 h L_2} \int_0^{L_2} \frac{x - x_1}{r_1^2} dx_1;$$

$$E_{1y} = \frac{q_c}{2\pi\epsilon_0 h L_2} y \int_0^{L_2} \frac{1}{r_1^2} dx_1;$$

или

$$E_{1x} = \frac{-q_c}{2\pi\epsilon_0 h L_2} \ln \left| \frac{(L_2 - x)^2 + y^2}{x^2 + y^2} \right|; \quad (19)$$

$$E_{1y} = \frac{q_c}{2\pi\epsilon_0 h L_2} \left(\operatorname{arctg} \frac{L_2 - x}{y} + \operatorname{arctg} \frac{x}{y} \right); \quad (20)$$

В электрическом поле заряда электрода под напряжением на заземленной пластине коллекторного электрода индуцируется отрицательный заряд. Координату по оси Ox напряженности E_{2x} в точке M электрического поля, создаваемого индуцированным зарядом, можно определить по формуле (19), если изменить уна $(a_2 - y)$ и знак на противоположный, а координату по оси Oy напряженности E_{2y} в точке M – по формуле (20), если изменить уна $(a_2 - y)$ (Рисунок 4б):

$$E_{2x} = \frac{q_c}{2\pi\epsilon_0 h L_2} \ln \left| \frac{(L_2 - x)^2 + (a_2 - y)^2}{x^2 + (a_2 - y)^2} \right|; \quad (21)$$

$$E_{2y} = \frac{q_c}{2\pi \varepsilon_0 h L_2} \left(\operatorname{arctg} \frac{L_2 - x}{a_2 - y} + \operatorname{arctg} \frac{x}{a_2 - y} \right); \quad (22)$$

По определению,

$$E_{ix} = E_{1x} + E_{2x}; \quad (23)$$

$$E_{iy} = E_{1y} + E_{2y}; \quad (24)$$

На прямой линии тока, проходящей через середины пластин $x = L_2/2$, координата напряженности по оси Ox равна нулю ($E_{ix} = 0$);

и справедливо равенство

$$U_c = \int_0^{a_2} E_{iy} dy;$$

или с учетом равенств (24) и (20), (22)

$$U_c = \frac{2q_c}{\pi \varepsilon_0 h L_2} \int_0^{a_2} \operatorname{arctg} \frac{L_2}{2y} dy;$$

Отсюда

$$U_c = \frac{q_c}{\pi \varepsilon_0 h} \left[\frac{2a_2}{L_2} \operatorname{arctg} \frac{L_2}{2a_2} + \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{4a_2^2}{L_2^2} \right) \right];$$

Из последнего уравнения можно найти заряд пластины электрода под напряжением при заданном потенциале по следующей формуле:

$$q_c = \pi \varepsilon_0 h U_c / \left[\frac{2a_2}{L_2} \operatorname{arctg} \frac{L_2}{2a_2} + \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{4a_2^2}{L_2^2} \right) \right]; \quad (25)$$

Максимальная напряженность E_{iym} электрического поля по оси O достигается вблизи пластин электродов и определяется по такой формуле:

$$E_{iym} = \frac{q_c}{2\pi \varepsilon_0 h L_2} \left(\pi + \operatorname{arctg} \frac{L_2 - x}{a_2} + \operatorname{arctg} \frac{x}{a_2} \right);$$

Дифференциальные уравнения (14) движения заряженной частицы аэрозоли в секции зоны ионизации справедливы и для секции зоны осаждения. Запишем их так:

$$\begin{cases} \rho \frac{D^3}{6} \frac{d^2 x}{dt^2} = q E_{ix} + \frac{3 \mu \pi D}{C_c} \left(v_{ax} - \frac{dx}{dt} \right); \\ \rho \frac{D^3}{6} \frac{d^2 y}{dt^2} = q E_{iy} + \frac{3 \mu \pi D}{C_c} \left(v_{ay} - \frac{dy}{dt} \right); \end{cases} \quad (26)$$

где q – заряд частицы, полученный в ионизаторе;

E_{ix}, E_{iy} – координаты напряженности, определяемые по формулам (23), (24).

Начальные условия записываются в таком виде:

$$\begin{cases} x = x_0; y = y_0 \\ \frac{dx}{dt} = v_{x0}; \frac{dy}{dt} = v_{y0}; \end{cases} \quad (27)$$

где x_0, y_0 – координаты частицы при входе в зону осаждения, равные координатам частицы на выходе из ионизатора с учетом переноса системы координат вдоль оси Ox ; v_{x0}, v_{y0} – координаты скорости частицы при входе в зону осаждения, равные координатам скорости частицы на выходе из ионизатора.

Показатели эффективности очистки воздуха от пыли

Объективная оценка чистоты воздуха по содержанию пыли в воздухе может быть получена, если известны функции распределения количественной или массовой доли частиц по размеру (диаметру) и требования к содержанию частиц в заданных диапазонах длины. Если плотность пылинок не зависит от их размеров, то между количественной долей и массовой долей сферических частиц пыли в заданном диапазоне размеров существует связь и достаточно рассмотреть количественные доли. Установлено, что функция распределения частиц пыли в воздухе по размерам соответствует логнормальному закону. Таким образом, для оценки чистоты воздуха в этом случае достаточно найти математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение случайной величины (размера частицы пыли) до и после очистки воздуха. В настоящее время требования к оценке

чистоты воздуха, основанные на законе распределения частиц по размерам, не регламентированы, и в качестве оценочных показателей используются экспериментальные данные концентрации частиц пыли заданного размера в некотором объеме воздуха до очистки и после очистки [18].

Пусть n_{bD} – число частиц пыли диаметром D в некотором объеме воздуха до фильтрации; n_{eD} – число частиц пыли диаметром D в том же объеме после фильтрации. Показатель P_D эффективности очистки воздуха по частицам размера D зададим формулой:

$$P_D = \frac{n_{bD} - n_{eD}}{n_{bD}}; \quad (28)$$

Пусть n_b – заданное число частиц пыли диаметром D , траектории которых рассчитываются; n_e – число частиц пыли диаметром D , траектории которых пересекают коллекторный электрод зоны ионизации или зоны осаждения. Для оценки показателя эффективности под величиной n_{bD} будем понимать заданное число n_b , под величиной n_{eD} – расчетное количество частиц n_e . При использовании формулы (28) будем задавать число n_b вместо n_{bD} и рассчитывать n_e вместо n_{eD} .

При определении траекторий частиц в секции зоны ионизации решались дифференциальные уравнения (14) для каждой частицы. Координата x_0 частицы по оси Ox на входе в секцию зоны ионизации принималась равной нулю. Начальная координата y_0 частицы по оси Oy на входе в секцию зоны ионизации назначалась. Предполагалось, что частица заданного размера с равной вероятностью может занимать любое положение между электродами, то есть начальная координата y_0 по оси Oy с равной вероятностью может быть любым числом в пределах от 0 или R до a_1 . Таким образом, в уравнениях (15) для i -й частицы принимались начальные условия:

$$x_0 = x_i, y_0 = y_i;$$

где x_i, y_i – координаты i -й частицы на входе в секцию зоны ионизации,

$$0 < i \leq n_b; x_i = 0; y_i = i \cdot a_1 / n_b;$$

Можно доказать, что траектории частиц, диаметры и начальные скорости которых соответственно равны, не пересекаются, если начальные координаты y_0 по оси Oy не равны. Отсюда можно сделать такой вывод: при задержании частицы с начальной координатой y_0 частицы, входящие в зону ионизации с той же скоростью и начальной координатой, превышающей y_0 , также задерживаются. По определению, при равномерном распределении частиц заданного диаметра по ширине секции зоны ионизации, на единицу ширины секции приходится n_b/a_1 частиц, и при минимальной начальной координате y_{0D} , приводящей к задержанию частицы, число n_e незадержанных частиц равно $n_b \cdot y_{0D}/a_1$, а число задержанных частиц равно $n_b \cdot (a_1 - y_{0D})/a_1$, то есть формулу (28) для оценки показателя P_{Di} эффективности очистки воздуха в зоне ионизации по частицам диаметра D можно записать так:

$$P_{Di} = \frac{a_1 - y_{0D}}{a_1}; \quad (29)$$

где y_{0D} – минимальная начальная координата частицы диаметром D по оси Oy , траектория которой пересекает пластину коллекторного электрода в зоне ионизации.

Полагая, что в промежутке между зоной ионизации и зоной осаждения и в промежутках между зонами осаждения частицы не двигаются вдоль оси Oy , приходим к выводу, что формулу (29) можно использовать и в общем случае, когда частицы задерживаются в зоне ионизации или в зонах осаждения. Запишем ее так:

$$P_D = \frac{a_1 - y_{0D}}{a_1}; \quad (30)$$

где y_{0D} – минимальная начальная координата частицы диаметром D по оси Oy , траектория которой пересекает пластину коллекторного электрода секции зоны ионизации или в одной из секций зоны осаждения.

Показатель эффективности очистки воздуха от пыли и время работы электрофилтра

Формула (30) для расчета показателя эффективности очистки воздуха по частицам заданного размера справедлива в том случае, когда воздух проходит через электрофильтр однократно. Она пригодна при расчете показателя в открытых негерметичных помещениях. Применительно к закрытым помещениям с малым воздухообменом ее необходимо усовершенствовать.

Пусть V – объем воздуха в закрытом помещении (м^3); m_0 – масса частиц заданного размера в объеме до очистки воздуха (кг); n – число проходов воздуха через электрофильтр; T – время работы вентилятора электрофильтра (с); Q_b – производительность вентилятора ($\text{м}^3/\text{с}$).

Отметим, что в соответствии с формулой (30) показатель P_D на каждом проходе не зависит от числа проходов n . По определению, масса m не уловленных электрофильтром частиц заданного диаметра за n проходов воздуха через электрофильтр определяется по формуле

$$m = m_0 (1 - P_D)^n;$$

Отсюда можно найти долю P_{DT} уловленных частиц за n проходов так:

$$P_{DT} = \frac{m_0 - m}{m_0} = 1 - (1 - P_D)^n;$$

или, так как $n \approx T \cdot Q_b / V$,

$$P_{DT} = 1 - (1 - P_D)^{\frac{T \cdot Q_b}{V}}; \quad (31)$$

Пусть T_1 – время, за которое вентилятор прокачает воздух в объеме V :

$$T_1 = V / Q_b;$$

Запишем формулу (31) в таком виде:

$$P_{DT} = 1 - (1 - P_D)^{\frac{T}{T_1}};$$

или

$$\frac{T}{T_1} = \frac{\ln(1 - P_{DT})}{\ln(1 - P_D)}; \quad (32)$$

Уравнение (32) можно использовать для оценки времени работы электрофильтра, обеспечивающего требуемый показатель P_{DT} эффективности

очистки воздуха в помещении с малым воздухообменом с внешней средой, если известен показатель эффективности P_D при однократном прогоне воздуха вентилятором за время T_1 .

Алгоритм расчета показателя эффективности очистки воздуха при однократном проходе через электрофильтр

1. Задание исходных данных с назначением D, n_L (>):

Таблица 1

Исходные данные

Обозначение	$e, \text{ Кл}$	$T, \text{ К}$	$k, \text{ Дж/К}$	$N_0, \text{ 1/м}^3$	$v_c, \text{ м/с}$	$v_z, \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$	$U_k, \text{ В}$	$\mu, \text{ Па} \cdot \text{с}$
Величина	$1.602 \cdot 10^{-19}$	293	$1.38 \cdot 10^{-23}$	$1 \cdot 10^{15}$	239	$1.4 \cdot 10^{-4}$	10000	$1.81 \cdot 10^{-5}$
Обозначение	$\rho_a, \text{ кг/м}^3$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$\epsilon_0, \text{ Кл}^2 / (\text{Н} \cdot \text{м}^2)$	ϵ	$h, \text{ м}$	$a_1, \text{ м}$	$a_2, \text{ м}$	$L_1, \text{ м}$
Величина	1.2	1000	$8.85 \cdot 10^{-12}$	3	0,15	$10 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	0.012
Обозначение	$L_2, \text{ м}$	$v_a, \text{ м/с}$	$v_{ax}, \text{ м/с}$	$v_{ay}, \text{ м/с}$	$D, \text{ м}$	$R, \text{ м}$	$U_c, \text{ В}$	n_b
Величина	0.012	0.7	0.7	0	$1 \cdot 10^{-7} \dots 1 \cdot 10^{-6}$	$15 \cdot 10^{-5}$	6000	1000
Обозначение	$n_{bD}, \%$	$y_0, \text{ м}$	n_L					
Величина	80..	$y_0 < a_1$	1..2					

2. $x_c = L_1/2$.

3. Оценка максимальной напряженности электрического поля в ионизаторе по формуле (8) и расчет q_k по формуле (7).

4. Установка номера i частицы: $i = 1$.

5. Задание координат x , участницы и скорости частицы заданного размера в момент $t = 0$ по формулам (15), где $y_0 = i \cdot a_1 / n_b$.

6. Численное решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений (14) методом Рунге-Кутта и расчет координат x, y точки (частицы) в секции зоны ионизации в моменты времени, когда $x \leq L_1$, и учете формулы (2) для определения r_1 ; формулы (3) для определения E_1 ; формулы (5) для определения r_3 ; формулы (4) для определения E_2 ; формул (6) для определения E_{ix}, E_{iy} ; формул (13) для определения E_{cx}, E_{cy} ; формулы (12) для определения E_c ; формул (10) и (11) для определения q как суммы зарядов частиц диаметром от 1 мкм до 10 мкм.

7. Завершение вычислений по алгоритму и расчет показателя

эффективности по формуле (30) для частиц диаметром D при $y_{0D} = y_0$, если выполнены неравенства $x \leq L_1$; $y \geq a_1$.

8. Численное решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений (26) методом Рунге-Кутты при начальных условиях (27), полученных из уравнений (14) на выходе частицы из зоны ионизации в моменты времени, когда $x \leq L_1 + L_2$, и учете формулы (25) для определения q_C ; формулы (19) для определения E_{1x} , формулы (20) для определения E_{1y} ; формулы (21) для определения E_{2x} ; формулы (22) для определения E_{2y} ; формулы (23) для определения E_{ix} ; формулы (24) для определения E_{iy} .

9. Завершение вычислений по алгоритму и расчет показателя эффективности по формуле (30) для частиц диаметром D при $y_{0D} = y_0$, если выполнены неравенства $x \leq L_1 + L_2$; $y \geq a_2$.

10. Численное решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений (26) методом Рунге-Кутты при начальных условиях (27), полученных из уравнений (26) на выходе частицы из 1-й зоны осаждения в моменты времени, когда $x \leq L_1 + 2 \cdot L_2$, и учете формулы (25) для определения q_C ; формулы (19) для определения E_{1x} , формулы (20) для определения E_{1y} ; формулы (21) для определения E_{2x} ; формулы (22) для определения E_{2y} ; формулы (23) для определения E_{ix} ; формулы (24) для определения E_{iy} .

11. Завершение вычислений по алгоритму и расчет показателя эффективности по формуле (30) для частиц диаметром D при $y_{0D} = y_0$, если выполнены неравенства $x \leq L_1 + 2 \cdot L_2$; $y \geq a_2$.

12. Увеличение номера i частицы на 1.

13. Переход к пункту 5, если выполняется неравенство $i < n_b$.

Влияние потенциала коронирующего электрода на напряженность электрического поля и зарядку частиц в ионизаторе

Напряженность электрического поля и заряд частицы пыли служат определяющими факторами, влияющими на характеристики движения частицы в зоне ионизации. При этом максимальная напряженность не должна

превышать напряженность пробоя, а средняя напряженность должна обеспечивать заряд частиц, достаточный для притяжения к осадительным электродам.

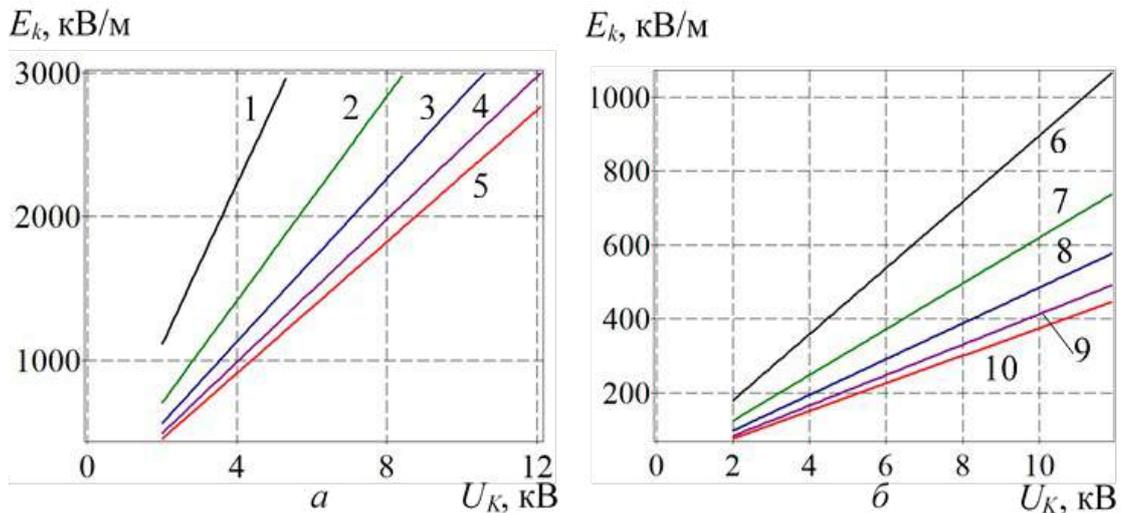


Рисунок 5. – Зависимости наибольшей (а) и средней (б) напряженности в ионизаторе от потенциала коронирующего электрода при исходных данных в Таблица 2.1, заданном радиусе R проволочного электрода и заданной координате y . 1 – $R = 0,5$ мм; 2 – $R = 1$ мм; 3 – $R = 1,5$ мм; 4 – $R = 2$ мм; 5 – $R = 2,5$ мм; 6 – $y = 2$ мм; 7 – $y = 3,5$ мм; 8 – $y = 5$ мм; 9 – $y = 6,5$ мм; 10 – $y = 8$ мм

Расчеты по формуле (8) показали, что потенциал коронирующего электрода от 10 до 11 кВ обеспечивает высокую максимальную напряженность, не превышающую напряженности пробоя при радиусе провода 1.5..2 мм (Рисунок 5а). При этом средняя напряженность электрического поля, определенная по формулам (12), (13), зависит от y и изменяется от 400 до 1000 кВ/м (Рисунок 5б).

Приняв за максимальную напряженность критическую начальную напряженность электрического поля, приводящую к возникновению коронного разряда и равную 1500 кВ/м, найдем, что при радиусе провода 1,5..2 мм потенциал коронирующего электрода достаточно устанавливать на уровне 6 кВ (Рисунок 5а). При этом средняя напряженность электрического поля в ионизаторе составит 220..550 кВ/м (Рисунок 5б). При задании максимальной напряженности от 2000 до 2500 кВ/м потенциал

коронирующего электрода необходимо увеличивать до 10 кВ и выше.

Удаленность траектории частицы от коронирующего электрода, характеризуемую координатой y_0 по оси Oy в момент входа частицы в зону ионизации, влияет на заряд, получаемый частицей (Рисунок 6). Расчеты по формулам (10), (11) показывают, что зарядка частиц размером 0,3 мкм и 0,8 мкм, начальная координата которых по оси Oy равна 8 мм, вдвое ниже тех, которые входят в зону ионизации с координатой 2 мм.

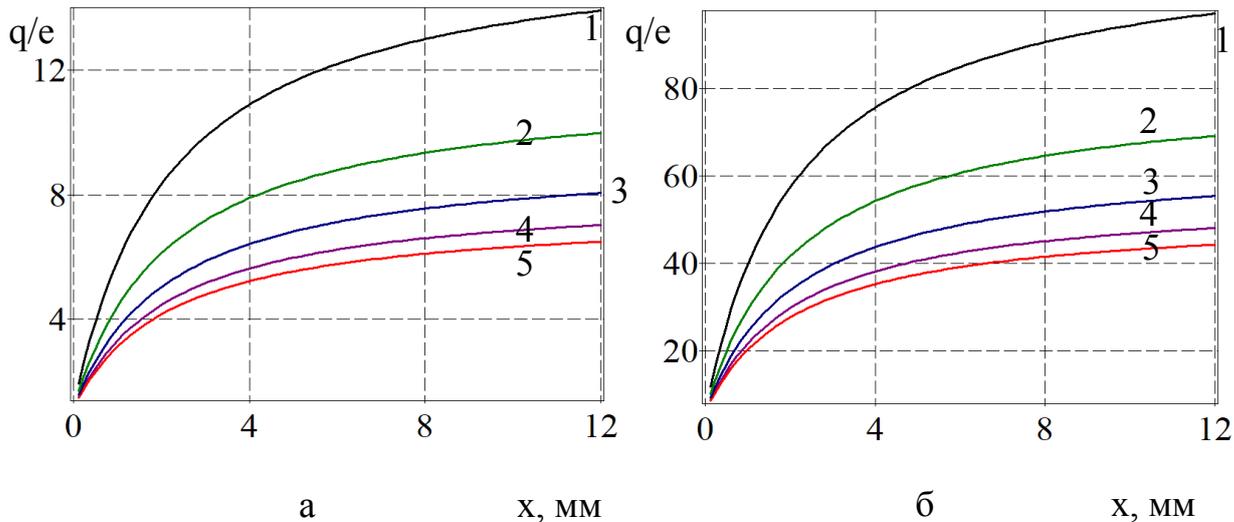


Рисунок 6. – Зависимости относительного заряда (в электронах) частицы размером 0,3 мкм (а) и 0,8 мкм (б) от пробега в зоне ионизации при исходных данных в): и заданной начальной координате y_0

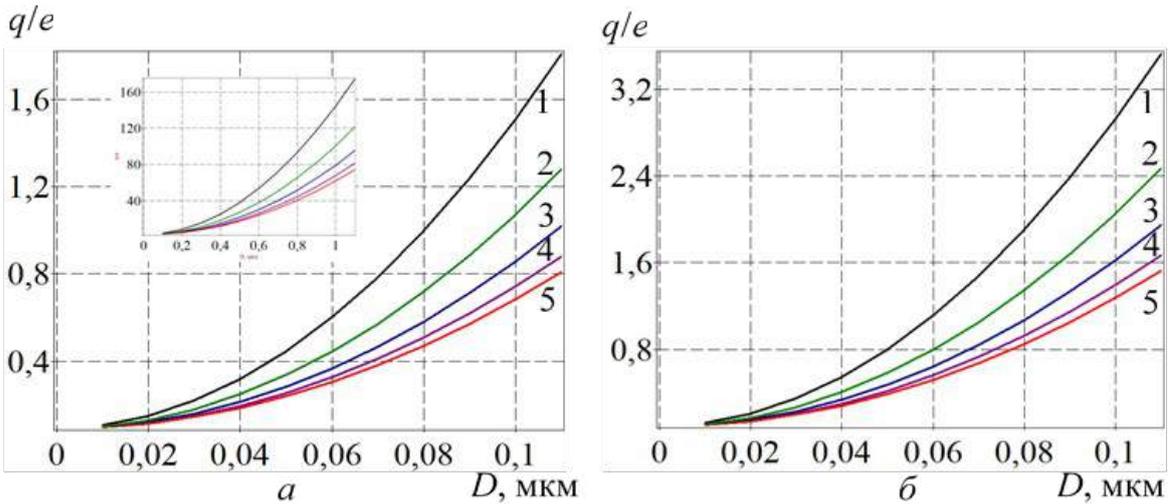
1 – $y_0 = 2$ мм; 2 – $y_0 = 3,5$ мм; 3 – $y_0 = 5$ мм; 4 – $y_0 = 6,5$ мм; 5 – $y_0 = 8$ мм

Отметим, что при скорости воздушного потока 0,7 м/с и длине зоны ионизации 12 мм частицы получают 95% максимального заряда. Так, удлинение зоны ионизации не приведет к существенному увеличению заряда частиц. При равномерном распределении пыли по ширине окна электрофильтра около половины частиц диаметром 0,1 мкм не получают заряд от коронирующего электрода с потенциалом 6 кВ (Рисунок 7а).

Минимальный заряд получают только те частицы, начальная координата которых по оси Oy в момент входа в ионизатор не превышает 5 мм. Таким образом, можно констатировать, что рассматриваемый электростатический фильтр с данными в):, фактически не обеспечивает

зарядку и фильтрацию более 50% частиц диаметром 0,1 мкм, поскольку они не заряжены.

Заряд частиц диаметром 0,1 мкм обеспечивается коронирующим электродом с потенциалом 10..12 кВ (Рисунок 7б).



Р
и
с
у
н
о
к
7.
—

Зависимости относительного заряда частицы (в электронах) от диаметра частицы при потенциале коронирующего электрода 6 кВ (а) и 12 кВ (б) и заданной начальной координате y_0

1 – $y_0 = 2$ мм; 2 – $y_0 = 3,5$ мм; 3 – $y_0 = 5$ мм; 4 – $y_0 = 6,5$ мм; 5 – $y_0 = 8$ мм

В представленном алгоритме под зарядом частицы понимается число q , не приведенное к кратному заряду электрона. То есть полагается, что и частицы с координатой y , превышающей 5 мм, получают заряд, который не превышает заряд электрона. Полагаем, что частица задерживается в зоне ионизации, если ее траектория пересекает пластину коллекторного электрода. Для определения условий задержания частицы в зоне ионизации необходимо найти траекторию ее движения.

Движение частиц в зоне ионизации

Определим теоретические условия задержания и осаждения частиц на пластине коллекторного электрода в зоне ионизации. Будем полагать, что частица задерживается пластиной коллекторного электрода, если траектория частицы пересекает пластину. Траектории частиц определялись из системы обыкновенных дифференциальных уравнений (14), решения которых получены численным методом Рунге-Кутты [15], [19], [20]. Условия задержания частицы с координатами x, y в какой-то момент имеют вид: $y \geq a_1$; $x \leq L_1$. Решения показали, что после входа в зону ионизации частицы отклоняются от прямолинейной траектории (Рисунок 8а).

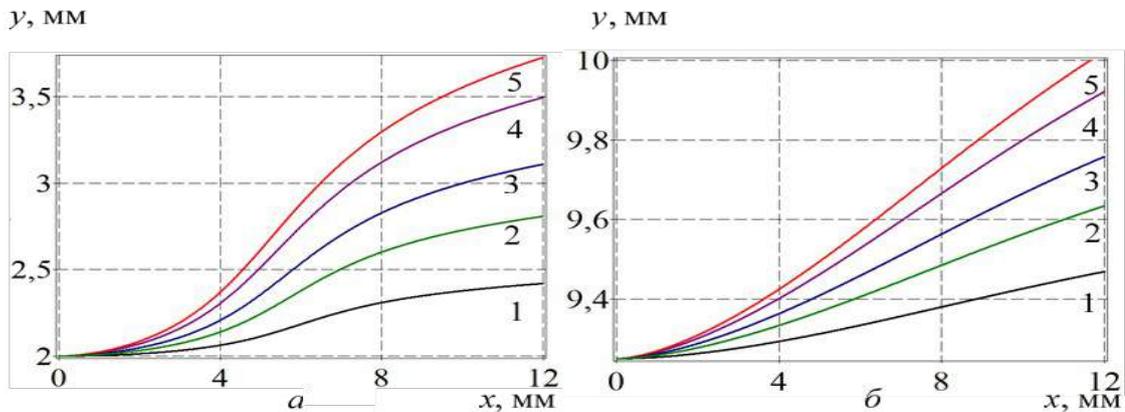


Рисунок 8. – Связь между координатами x, y движущихся частиц разных диаметров D при входе в зону ионизации в точке с начальной координатой y_0 , равной 2 мм (а) и 9,25 мм (б)

1 – $D = 0,1$ мкм; 2 – $D = 0,3$ мкм; 3 – $D = 0,5$ мкм; 4 – $D = 0,8$ мкм; 5 – $D = 1$ мкм

Найдем показатель эффективности для частиц диаметром 1 мкм, 0,8 мкм, 0,5 мкм и 0,3 мкм без учета зон осаждения. Частицы диаметром 1 мкм, входящие в зону ионизации на расстоянии 0,75 мм от коллекторной пластины и менее, сталкиваются с пластиной и задерживаются (Рисунок 8б). Таким образом, 7,5 % частиц данного размера задерживаются в зоне ионизации. Аналогично, варьируя начальной координатой y_0 , можно рассчитать массовые доли задерживаемых на коллекторной пластине частиц диаметром 0,8 мкм, 0,5 мкм и 0,3 мкм. Они равны соответственно 6,5 %, 5 % и 4 % (Рисунок 9).

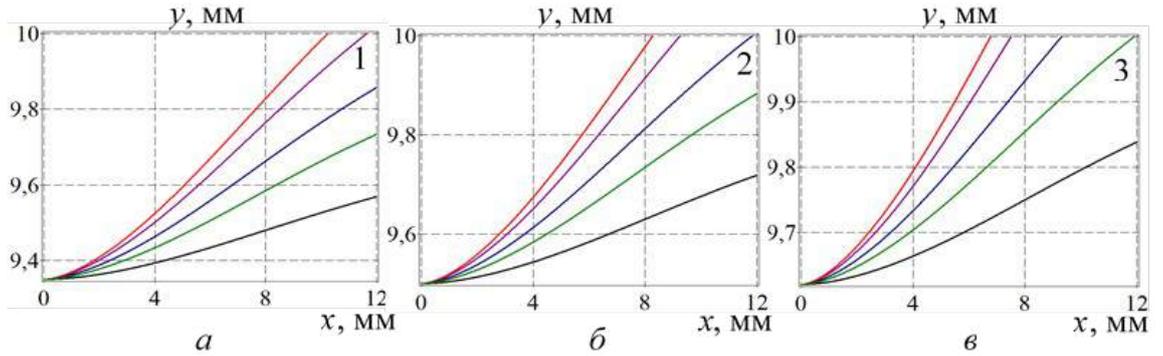


Рисунок 9. – Связь между координатами x , y движущихся частиц разных диаметров D при входе в зону ионизации в точке с начальной координатой y_0 , равной 9.35 мм (а), 9.5 мм (б) и 9.6 мм (в)
 1 – $D = 0,8$ мкм; 2 – $D = 0,5$ мкм; 3 – $D = 0,3$ мкм

Напряженность электрического поля в зоне осаждения и связь длины пластин электродов с напряженностью

Электрическое поле между электродами зоны осаждения, обеспечивающее дрейф частиц к коллекторным электродам, неоднородно (Рисунок 10).

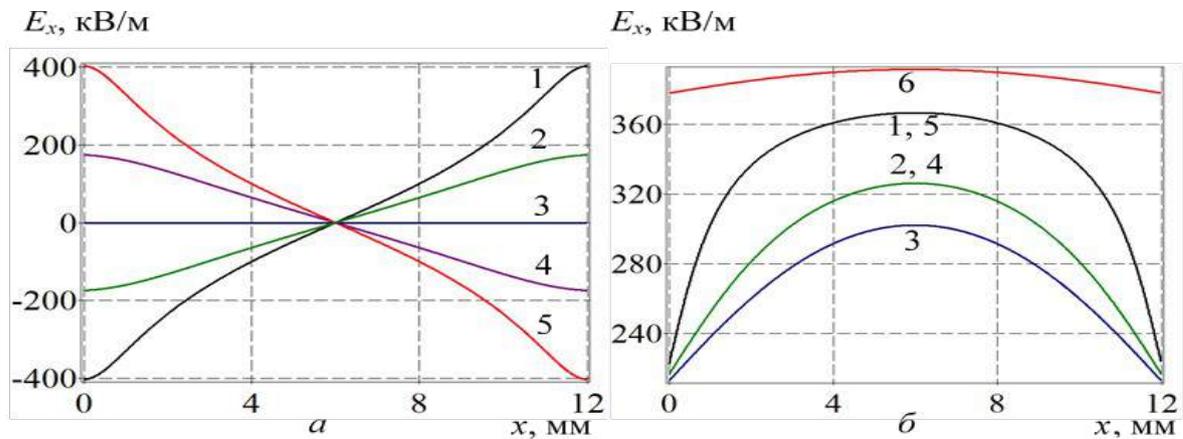


Рисунок 10. – Координаты напряженности электрического поля E_x (а) и E_y (б) от электрода с потенциалом 4 кВ в точках сечения зоны осаждения с координатами x
 1 – $y = 1$ мм; 2 – $y = 3$ мм; 3 – $y = 6$ мм; 4 – $y = 9$ мм; 5 – $y = 11$ мм; 6 – $y = 0$ мм

Однородность напряженности в зоне осаждения значительно повышается с увеличением длины пластин электродов (Рисунок 11).

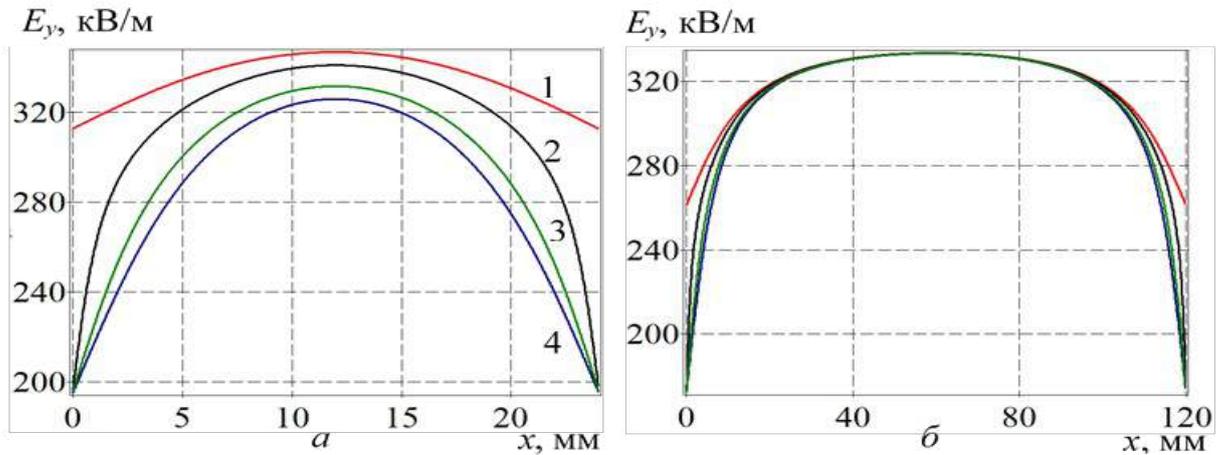


Рисунок 11. – Координата напряженности электрического поля E_y от электрода с потенциалом 4 кВ в точках зоны осаждения с координатами x , y при длине пластины 24 мм (а) и 120 мм (б)
 1 – $y = 0$ мм; 2 – $y = 1$ мм, $y = 11$ мм; 3 – $y = 3$ мм; $y = 9$ мм, 4 – $y = 6$ мм

Можно видеть, что с увеличением длины пластин электродов напряженность на средней линии между пластинами увеличивается, а на удаленных от средних линий уменьшается. Отсюда можно заключить, что с уменьшением длины пластин сила Кулона, обеспечивающая притяжение частицы к коллекторному электроду, возрастает. Малая длина пластины коллекторного электрода может оказаться недостаточной для того, чтобы за время движения частицы между электродами ее траектория пересекла границу пластины. Обеспечить столкновение частицы с пластиной можно либо за счет удлинения пластины, либо за счет добавления зоны осаждения с пластинами той же длины и отстоящей от предыдущей зоны на некотором расстоянии. Второе решение обеспечивает более эффективное удержание частиц на коллекторном электроде при сохранении заряда.

Исследование скорости воздушного потока и количества зон осаждения

В соответствии с формулой (32) показатель эффективность очистки воздуха зависит от очистки при однократном проходе воздуха через фильтр и от отношения производительности вентилятора к скорости воздухообмена.

Оценим длину зоны осаждения, обеспечивающую улавливание частицы при однократном проходе воздуха. Рассмотрим частицу диаметром 0,5 мкм. При входе в зону осаждения на расстоянии 4 мм от коллекторной пластины ее скорость дрейфа варьирует от 0,04 до 0,06 м/с (Рисунок 12).

Расчеты показали, что скорость частицы вдоль пластин электродов близка к скорости воздушного потока 0.7 м/с, и траектория частицы пересечет коллекторную пластину, если длина последней составит 55 мм. Для улавливания частиц, входящих в зону осаждения на расстоянии 10 мм от заряженной пластины ($y_0 = 2$ мм), длину коллекторной пластины необходимо увеличить до 70 мм.

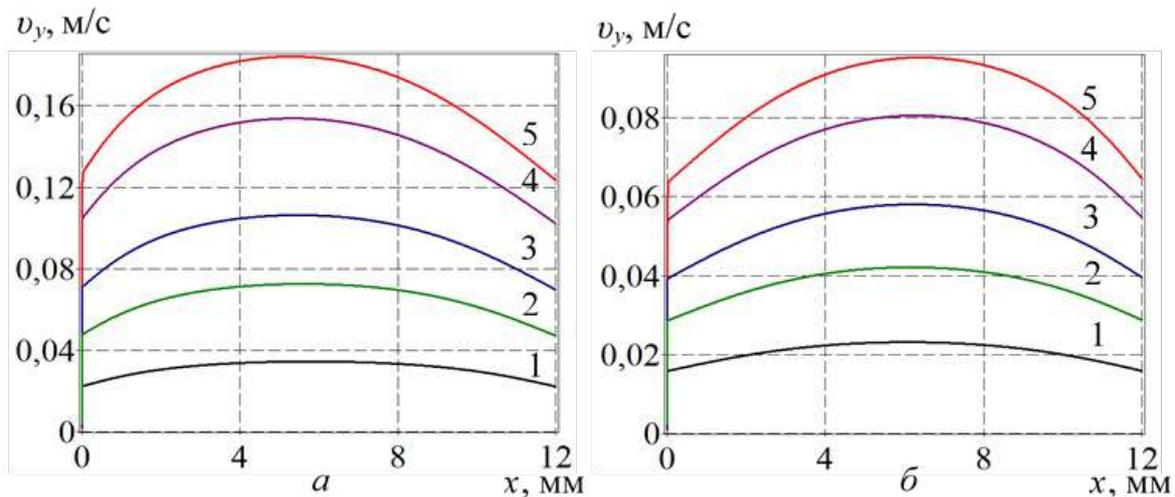


Рисунок 12. – Зависимость координаты скорости частицы диаметром D вдоль оси Oy от координаты x в зоне осаждения при входе на расстоянии от коллекторной пластины 10 мм (а) и 4 мм (б)

1 – $D = 0,1$ мкм; 2 – $D = 0,3$ мкм; 3 – $D = 0,5$ мкм; 4 – $D = 0,8$ мкм; 5 – $D = 1$ мкм

Учитывая, что при движении в ионизаторе частица приблизится к коллекторной пластине на 1 мм и более и $y_{0D} = y_0 - 1$, показатель эффективности, рассчитанный по формуле (30), при длине пластины 70 мм составит более 90%:

$$P_D = \frac{a_1 - y_{0D}}{a_1} = \frac{10 - 1}{10} = 0,9;$$

Таким образом, предварительная оценка показывает, что одной зоны осаждения с пластинами длиной 12 мм для улавливания частиц диаметром 0,5 мкм при однократном проходе воздуха через электрофильтр недостаточно.

Найдем расчетные по формуле (30) показатели эффективности очистки воздуха на основе анализа траекторий движения частиц диаметром 0,1 мкм, 0,3 мкм, 0,5 мкм и 0,8 мкм за один проход воздуха через электрофильтр. Будем определять такую траекторию частицы, которая пересекает дальний край коллекторной пластины зоны осаждения и фиксировать при этом начальную координату y_0 частицы при входе в секцию зоны ионизации. Можно доказать, что все частицы данного размера, входящие в зону ионизации с начальной координатой, превышающей y_0 , будут улавливаться коллекторной пластиной. Поиск величины y_0 расчетным путем требует значительного машинного времени. Поэтому минимальную начальную координату y_0 будем оценивать визуально по графикам траекторий, определяя ту, которая пересекает дальний край коллекторного электрода. На рисунках 13...16 показаны траектории частиц, позволяющие оценить минимальную начальную координату y_0 .

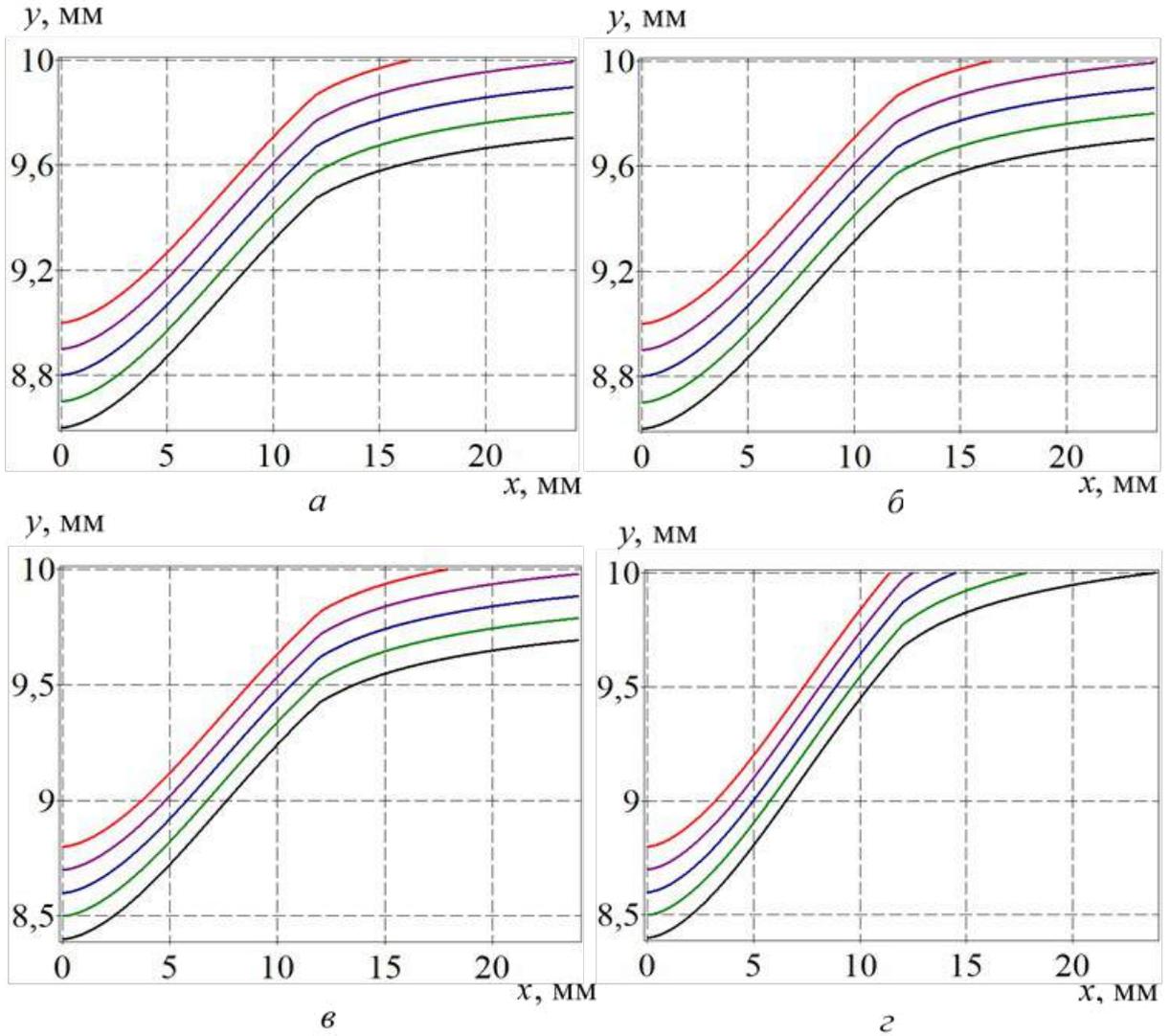


Рисунок 13. – Траектории частицы диаметром 0,1 мкм с начальными координатами от 8,6 до 9,0 мм (а), диаметром 0,3 мкм с начальными координатами от 8,6 до 9,0 мм (б), диаметром 0,5 мкм с начальными координатами от 8,4 до 8,8 мм (в), диаметром 0,8 мкм с начальными координатами от 8,4 до 8,8 мм (г) в зоне ионизации длиной 12 мм и в одной зоне осаждения длиной 12 мм при скорости воздуха 0,7 м/с

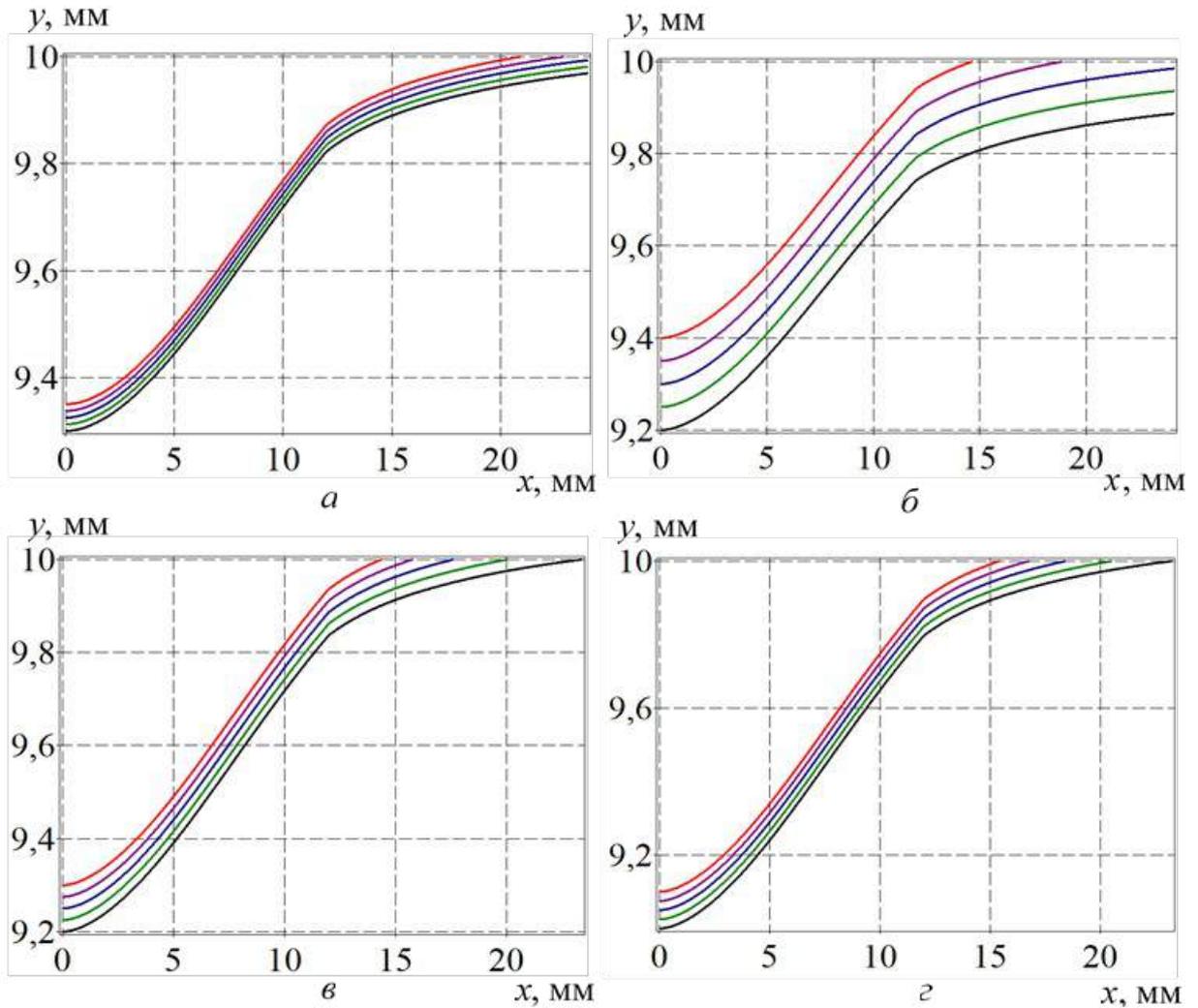


Рисунок 14. – Траектории частицы диаметром 0.1 мкм с начальными координатами от 9.3 до 9.35 мм (а), диаметром 0.3 мкм с начальными координатами от 9.2 до 9.4 мм (б), диаметром 0.5 мкм с начальными координатами от 9.2 до 9.3 мм (в), диаметром 0.8 мкм с начальными координатами от 9.0 до 9.1 мм (г) в зоне ионизации длиной 12 мм и в одной зоне осаждения длиной 12 мм при скорости воздуха 1 м/с

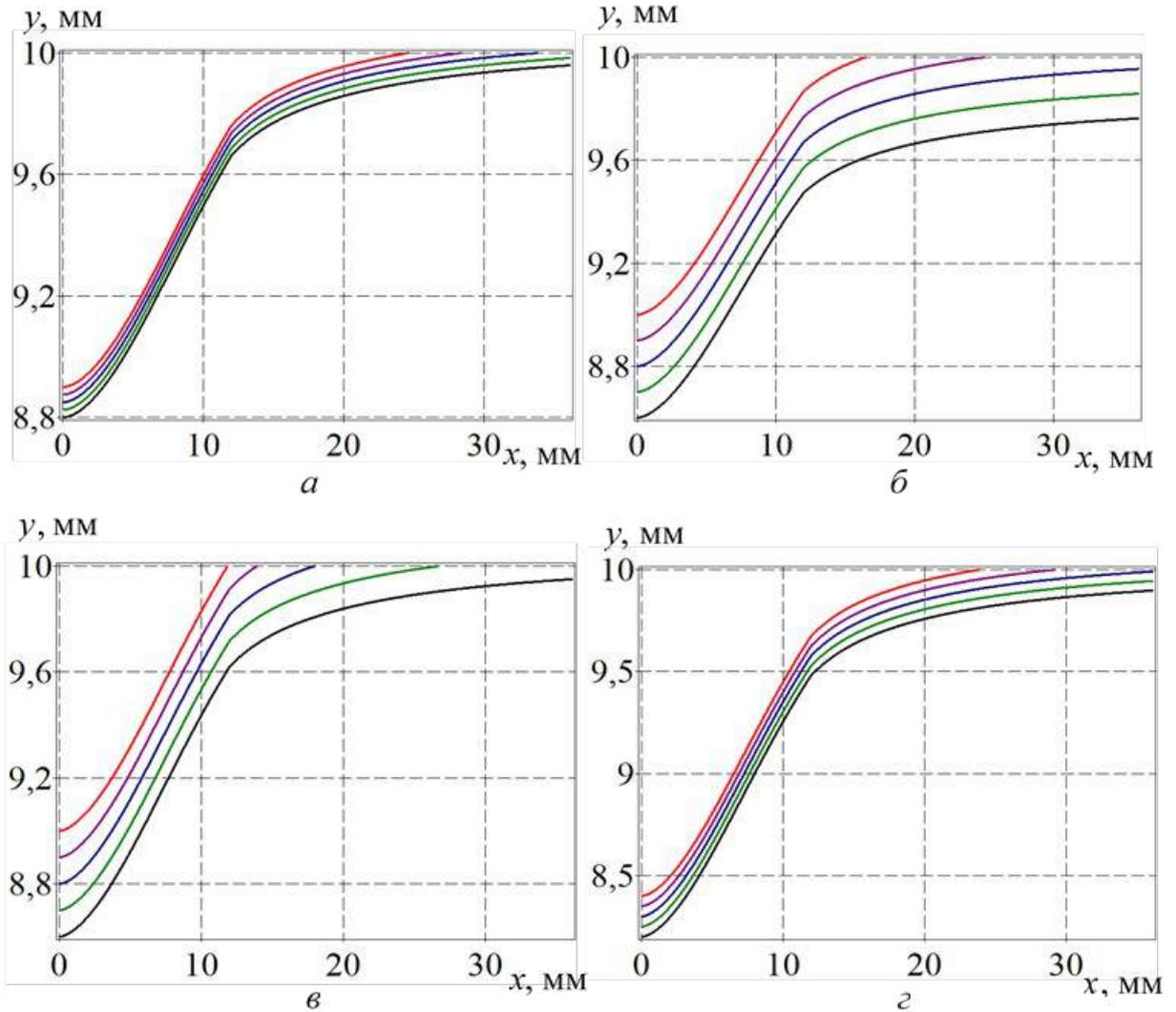


Рисунок 15. – Траектории частицы диаметром 0,1 мкм с начальными координатами от 8,8 до 8,9 мм (а), диаметром 0,3 мкм с начальными координатами от 8,6 до 9,0 мм (б), диаметром 0,5 мкм с начальными координатами от 8,6 до 9,0 мм (в), диаметром 0,8 мкм с начальными координатами от 8,2 до 8,4 мм (г) в зоне ионизации длиной 12 мм и в двух зонах осаднения длиной 12 мм каждая при скорости воздуха 0,7 м/с

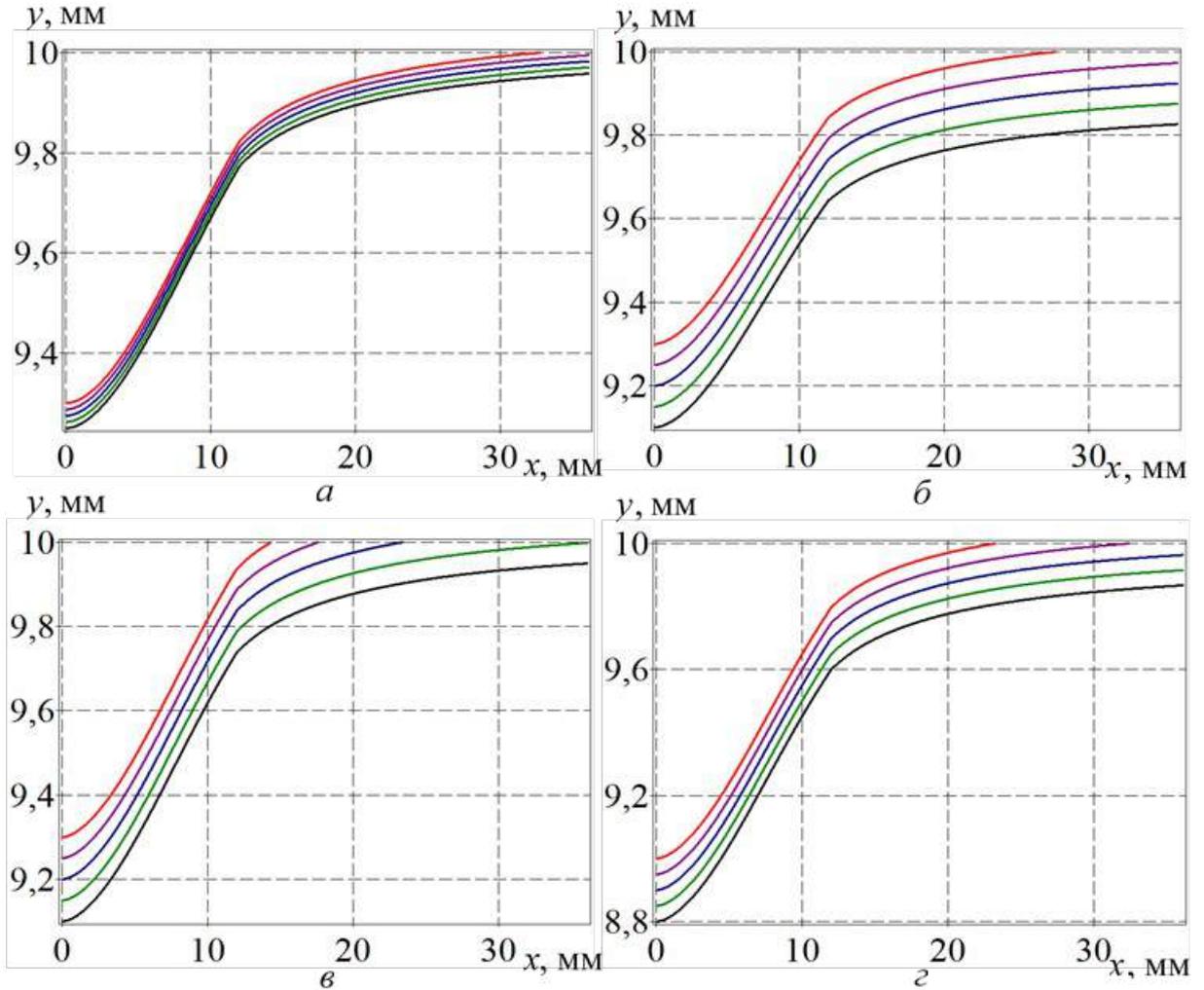


Рисунок 16. – Траектории частицы диаметром 0,1 мкм с начальными координатами от 9,25 до 9,3 мм (а), диаметром 0,3 мкм с начальными координатами от 9,0 до 9,2 мм (б), диаметром 0,5 мкм с начальными координатами от 9,1 до 9,3 мм (в), диаметром 0,8 мкм с начальными координатами от 8,8 до 9,0 мм (г) в зоне ионизации длиной 12 мм и в двух зонах осаждения длиной 12 мм каждая при скорости воздуха 1 м/с

Более 80 % частиц диаметром от 0,1 до 0,8 мкм не улавливаются при однократном проходе воздуха через электрофильтр со скоростью 0,7 м/с и выше и длине коллекторных пластин в зоне осаждения 12 мм (Таблица 2).

Таблица 2.

Расчетные значения показателя P_D эффективности по данным траекторий движения частицы на рисунках 13...16

Число зон осаждения n_L	Скорость воздуха v_{ax} , м/с	Диаметр частицы D , мкм	Минимальная начальная координата y_{0D} , мм	Показатель эффективности очистки воздуха P_D
1	0,7	0,1	8,9	0,11
		0,3	8,9	0,11
		0,5	8,7	0,13
		0,8	8,4	0,16
	1,0	0,1	9,3	0,07
		0,3	9,3	0,07
		0,5	9,2	0,08
		0,8	9,1	0,09
2	0,7	0,1	8,9	0,11
		0,3	8,9	0,11
		0,5	8,7	0,13
		0,8	8,3	0,17
	1,0	0,1	9,3	0,07
		0,3	9,25	0,075
		0,5	9,15	0,085
		0,8	8,9	0,11

Добавление второй зоны осаждения практически не влияет на улавливание мелких частиц диаметром до 0,5 мкм и повышает эффективность улавливания частиц диаметром 0,8 мкм на 1..2 % (Таблица 2).

Повышение скорости воздушного потока, создаваемого вентилятором, с 0,7 м/с до 1 м/с приводит к снижению показателя P_D эффективности очистки воздуха при однократном проходе на 4..6 % (Таблица 2).

Оценка связи между показателем эффективности очистки воздуха и временем работы электрофильтра

Формула (32) позволяет оценить время T очистки воздуха по частицам заданного диаметра при малом воздухообмене с внешними объектами, если задан требуемый показатель P_{DT} эффективности очистки воздуха и определен показатель P_D эффективности при однократном проходе частиц.

На рисунке 17 представлены номограммы, позволяющие оценить относительное время T/T_1 очистки воздуха от пыли по заданному показателю P_{DT} эффективности и определенному показателю P_D эффективности при однократном проходе воздуха через электрофильтр.

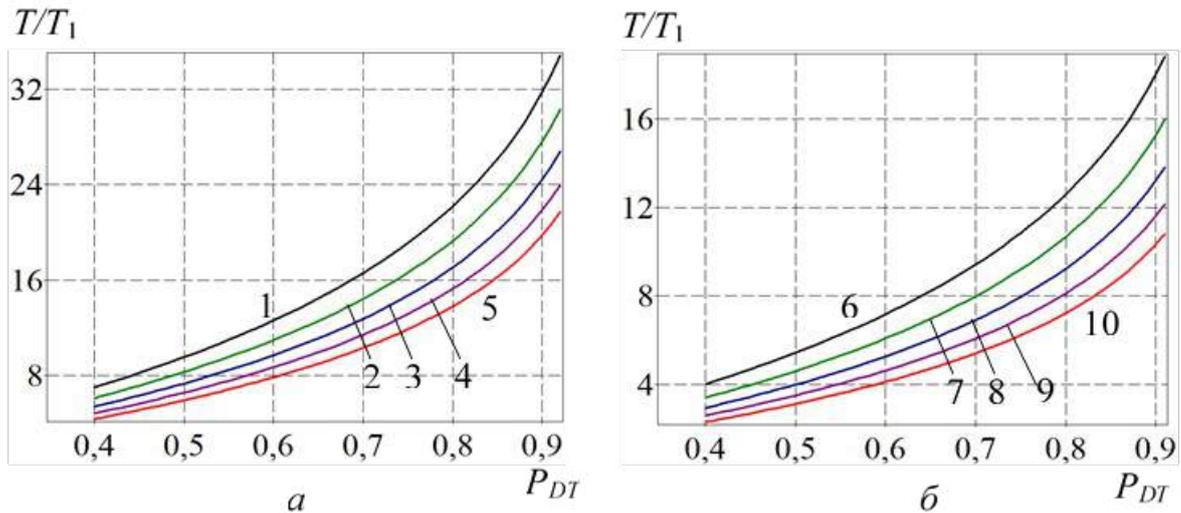


Рисунок 17. – Зависимости отношения T/T_1 от показателя P_{DT} при заданных значениях показателя P_D в пределах от 0,07 до 0,11 (а) и от 0,12 до 0,20 (б)

1 – $P_D = 0,07$; 2 – $P_D = 0,08$; 3 – $P_D = 0,09$; 4 – $P_D = 0,10$; 5 – $P_D = 0,11$; 6 – $P_D = 0,12$;
7 – $P_D = 0,14$; 8 – $P_D = 0,16$; 9 – $P_D = 0,18$; 10 – $P_D = 0,20$

Показатель P_D электрофильтра с одной зоной осаждения при скорости воздушного потока 0,7 м/с для частиц диаметром 0,3 мкм, 0,5 мкм и 0,8 мкм равен соответственно 0,11, 0,13 и 0,16 (Таблица 2). Относительное время T/T_1 , требуемое для улавливания 80% этих частиц, соответственно равно примерно 13, 11 и 7 (Рисунок 17). При скорости воздушного потока 1 м/с показатели P_D уменьшаются до 0,075, 0,085, 0,11, а относительное время увеличивается до 20, 17 и 13 соответственно. Таким образом, при увеличении скорости воздушного потока на 43 % и вместе с этим снижением времени T_1 на 43%, относительное время T/T_1 для обеспечения того же качества очистки увеличилось более чем на 50%, то есть общее время возросло. Добавление второй зоны осаждения практически не изменяет относительное время T/T_1 .

Таким образом, меньшая скорость воздушного потока 0,7 м/с обеспечивает меньшее время улавливания 80% частиц диаметром 0,3 мкм, 0,5 мкм и 0,8 мкм, чем скорость 1 м/с; и две зоны осаждения не имеют преимуществ по времени очистки перед одной зоной осаждения.

Можно видеть, что с увеличением показателя эффективности относительное время и время очистки увеличиваются, при этом быстрота увеличения относительного времени очистки превосходит быстроту увеличения показателя эффективности.

Отметим, что при многократном воздухообмене показатель P_D возрастает с каждым проходом, и время, за которое показатель P_{DT} достигнет заданного значения, будет меньше расчетного. Это объясняется тем, что частицы пыли, не уловленные на втором и дальнейшем проходах, имеют больший заряд, так как при первом проходе их траектории располагались ближе к коронирующему электроду.

Из вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Разработанная математическая модель движения частицы в зонах ионизации и осаждения позволяет определять показатель эффективности очистки воздуха по частицам заданного диаметра при однократном проходе воздуха через электрофильтр.

2. Предложенный показатель эффективности очистки воздуха по частицам заданного диаметра устанавливает связь между долей частиц в воздухе, показателем эффективности при однократном проходе воздуха через фильтр и временем очистки.

3. Потенциал коронирующего электрода от 10 до 11 кВ обеспечивает максимальную напряженность в зоне ионизации, не превышающую напряженности пробоя. При этом средняя напряженность электрического поля в зоне ионизации изменяется от 400 до 1000 кВ/м.

4. Скорость воздушного потока 0.7 м/с имеет преимущество перед скоростью 1 м/с, обеспечивая меньшее время очистки воздуха до состояния, в котором доли частиц диаметром 0.3 мкм, 0.5 мкм и 0.8 мкм составляют 20% соответственно; такое же преимущество имеет одна зона осаждения перед двумя зонами.

5. Построенные номограммы зависимости относительного времени очистки от показателя эффективности позволяют рассчитать время очистки и доказывают, что с увеличением показателя эффективности относительное время и время очистки увеличиваются, при этом быстрота увеличения относительного времени очистки превосходит быстроту увеличения показателя эффективности.