

*И.Ф. Рахимов**Л.Г. Татаров, канд. техн. наук*

Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЕСПЫЛИВАНИЯ ВОЗДУХА ЖИВОТНОВОДЧЕСКОГО ПОМЕЩЕНИЯ

Работникам животноводства постоянно приходится сталкиваться с веществами, находящимися в измельченном состоянии. Целью многих технологических процессов является приведение твердых веществ в пылевидное состояние (например, помол зерна для получения муки). Загрязнение воздуха в помещениях является одним из наиболее серьезных рисков для здоровья человека [1]. Существует несколько технологий очистки воздуха от пыли, наиболее эффективной из которых является очистка под действием электрического поля [2].

Первоначально незаряженные аэрозольные частицы после включения электрофильтра получают в униполярно ионизированном воздухе электрический заряд той же полярности. В помещении создается электрическое поле, обусловленное в общем случае тремя причинами: 1) разностью потенциалов между коронирующей системой электродов электрофильтра и заземленными частицами помещения (эта причина существует лишь в случае применения коронно-разрядного электрофильтра при условии открытого расположения коронирующих электродов); 2) пространственным зарядом униполярных ионов; 3) пространственным зарядом униполярно заряженных аэрозольных частиц.

Электрическое поле, порожденное первыми двумя причинами, можно назвать внешним по отношению к аэрозолю, а электрическое поле, порожденное третьей причиной, внутренним. Соответственно следует различать механизмы осаждения заряженного аэрозоля под действием внешнего и внутреннего электрических полей. Последний известен в механике аэрозолей под названием электростатического рассеяния.

В общем случае в помещении может находиться источник аэрозоля (производственное помещение с пылевыделением), а система очистки птицеводческого помещения — состоять из фильтра приточного воздуха (ФПВ), фильтра вытяжного воздуха (ФВВ), т. е. оборудования приточно-вытяжной системы вентиляции, а также включать в себя коронно-разрядный электрофильтр.

Надо рассмотреть решение задачи для вентилируемого птицеводческого помещения при наличии в нем источника пылевыделения с учетом как внешнего, так и внутреннего электрических полей.

В помещении с внутренним объемом  $V$  и площадью внутренней поверхности  $S$  установлен электрофильтр, включающийся в момент времени  $t = 0$ , когда счетная концентрация аэрозоля в помещении равна  $n_0$  (среднее значение). В помещение поступает приточный вентиляционный воздух со счетной концентрацией аэрозольных частиц  $n_1$ . Кратность воздухообмена (т. е. отношение объема поступающего или удаляемого за 1 ч воздуха к внутреннему объему помещения) равна  $N$ . Распределенный источник аэрозоля, находящийся в помещении, «производит»  $X$  частиц за 1 ч. Следует определить основные закономерности изменения во времени среднего значения счетной концентрации аэрозоля  $n$  в помещении.

Для решения задачи принимаем ряд допущений: 1) концентрация аэрозоля в данный момент одинакова во всех точках внутри помещения; 2) аэрозоль монодисперсен и химически однороден, его частицы имеют сферическую форму; 3) движение частиц подчиняется закону Стокса; 4) заряд приобретает частицей мгновенно и затем не изменяется; заряд всех частиц одинаков; 5) коагуляция частиц отсутствует; 6) на частицу действуют только сила тяжести и силы со стороны внутреннего и внешнего электрических полей (не учитываются термофорез, пондеромоторные силы, диффузия, силы инерции, электрический ветер и силы зеркального отображения, действующие на частицу вблизи поверхности помещения); 7) частица, осевшая на поверхность, не уносится с нее обратно; 8) кратность воздухообмена  $N$ , производительность источника аэрозоля  $X$ , напряженность внешнего электрического поля и концентрация ионов в помещении постоянны во времени; 9) приточный воздух и воздух помещения имеют одинаковую температуру.

Уравнение материального баланса аэрозоля в помещении для элементарного интервала времени  $(t; t + dt)$ :

$$dq = dq_1 + dq_2 - dq_3 - dq_4, \quad (1)$$

где  $dq$  — изменение количества аэрозольных частиц в помещении;  $dq_1$  — количество аэрозольных частиц, поступивших в помещение от распределенного источника аэрозоля;  $dq_2$  — количество аэрозольных частиц, поступивших в помещение с приточным вентиляционным воздухом;  $dq_3$  — количество аэрозольных частиц, удален-

ных из помещения с вытяжным вентиляционным воздухом;  $dq_4$  — количество аэрозольных частиц, осажденных в помещении под действием электрических сил и силы тяжести.

Очевидно, что

$$dq_1 = Xdt; \quad (2)$$

$$dq_2 = n_1 NVdt; \quad (3)$$

$$dq_3 = nNVdt. \quad (4)$$

Легко получить и выражение для  $dq_4$ :

$$dq_4 = ndt \int (\overline{W}_e + \overline{W}_g) \overline{ds}, \quad (5)$$

где  $\overline{W}_e$  — скорость движения частицы пыли под действием электрических сил, так называемая скорость дрейфа;  $\overline{W}_g$  — скорость движения частицы пыли под действием силы тяжести;  $\overline{ds}$  — векторный элемент поверхности помещения, направленный по нормали изнутри наружу;  $S_0$  — часть внутренней поверхности, на которой выполняется условие

$$(\overline{W}_e + \overline{W}_g) \overline{ds} > 0. \quad (6)$$

Условие (6) представляет собой математическую запись того обстоятельства, что пылинка, находящаяся у поверхности помещения, оседает на нее только в том случае, если нормальная составляющая ее результирующей скорости направлена к поверхности [3]. Это условие, как показывают расчеты, в реальных условиях применения электрической фильтрации в большинстве случаев выполняется на всей внутренней поверхности помещения, т. е. можно принять  $S_0 = S$ . Учитывая также, что поток постоянного вектора  $\overline{W}_g$  через замкнутую поверхность  $S$  равен нулю:

$$dq_4 = ndt \int \overline{W}_e \overline{ds}. \quad (7)$$

Получаем

$$dq_4 = nW_{e1} S dt + n^2 a_1 S dt, \quad (8)$$

учитывая, что

$$dq = Vdn, \quad (9)$$

и подставляя в уравнение (1) выражения (2), (3), (4), (8), после преобразований получим

$$\frac{dn}{dt} = n_1 N + \frac{X}{V} - \left( \frac{W_{e1} S}{V} + N \right) n - \frac{a_1 S}{V} n^2. \quad (10)$$

Решив это уравнение при начальных условиях, получим уравнение кинетики осаждения аэрозоля:

$$n = \frac{F_1 - F_2 P \exp(t\sqrt{D})}{1 - P \exp(t\sqrt{D})}, \quad (11)$$

где

$$F_1 = \frac{b + \sqrt{D}}{-2a}; F_2 = \frac{b - \sqrt{D}}{-2a}; P = \frac{2an_0 + b + \sqrt{D}}{2an_0 + b - \sqrt{D}}; \quad (12)$$

$$D = b^2 + 4ad;$$

$$a = \frac{a_1 S}{V} = \frac{Q^2 B}{\varepsilon_0}; b = \frac{W_{e1} S}{V} + N = \frac{\varepsilon_0 QBS}{V} + N;$$

$$d = n_1 N + \frac{X}{V}. \quad (13)$$

Очевидно, что установившаяся концентрация аэрозоля  $n_\infty$  равна одному из корней квадратного трехчлена в правой части уравнения (10):

$$n_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} n = F_2 = \frac{b - \sqrt{D}}{-2a} = \frac{2d}{b + \sqrt{D}} =$$

$$= 2 \left( n_1 N + \frac{X}{V} \right) / \left[ \frac{E_0 QBS}{V} + N + \sqrt{\left( \frac{E_0 QBS}{V} + N \right)^2 + 4 \left( n_1 N + \frac{X}{V} \right) \frac{Q^2 B}{\varepsilon_0}} \right]. \quad (14)$$

Качество очистки воздуха птицеводческих помещений от аэрозольных частиц при электрической фильтрации следует характеризовать двумя показателями:

эффективностью

$$\eta = \frac{n_0 - n}{n_0}, \quad (15)$$

и предельной эффективностью

$$\eta_\infty = \frac{n_0 - n_\infty}{n_0}. \quad (16)$$

Первый показатель отражает степень очистки воздуха за любое конечное время, второй — за время, равное или большей длительности «переходного» процесса (теоретически — за бесконечно большое время). При увеличении временного интервала, разделяющего измерения концентрации  $n_0$  и  $n_\infty$ , величина  $\eta$  растет от 0 до  $\eta_\infty$ . Подставляя в (16)  $n_\infty$  из (14), получим формулу

$$\eta_\infty = 1 - \frac{2d}{(b + \sqrt{D})n_0}, \quad (17)$$

справедливую для любого значения начальной концентрации  $n_0$ , т. е. по ней можно рассчитать предельную эффективность очистки воздуха рабочей зоны птицеводческого помещения за счет совместного действия системы вентиляции и электрофильтра [2].

Как с точки зрения исследования закономерностей очистки воздуха при помощи электрической фильтрации, так и с точки зрения практических потребностей прогнозирования гигиенического действия электрофильтра в вентилируемом птицеводческом помещении большее значение имела формула предельной эффективности собственно электрофильтра. Такую формулу можно получить в предположении, что включение электрофильтра происходит тогда, когда концентрация

аэрозоля в птицеводческом помещении уже приняла установившееся значение  $\eta_\infty$ , соответствующее данной кратности воздухообмена. При этом условии дальнейшее снижение концентрации аэрозоля будет происходить уже только за счет электрической фильтрации.

Итак, чтобы получить формулу предельной эффективности собственно электрофильтра, надо заменить в (17)  $n_0$  на  $\eta_\infty$ . В свою очередь установившуюся концентрацию аэрозоля в отсутствие электрической фильтрации  $\eta_\infty$  найдем из выражения (14), приняв там  $E_0 = 0$ ;  $Q = 0$ :

$$n_\infty = \frac{n_1 NV + X}{NV}, \quad (18)$$

или учитывая (13),

$$n_\infty = \frac{d}{N}. \quad (19)$$

Подставляя выражение (19) в (17), получим

$$n_\infty = 1 - \frac{2N}{b + \sqrt{D}}. \quad (20)$$

Совершенно очевидно, что сравнение (с точки зрения гигиенического действия) различных эксплуатационных режимов и типов электрофильтров только по их предельной эффективности  $\eta_\infty$  является неполным. Важное значение имеет также и скорость процесса очистки, которую можно характеризовать некоторым временным параметром.

Общее уравнение (11) не содержит какого-либо имеющего очевидный физический смысл параметра, который можно было бы принять за постоянную времени процесса. В данном случае скорость очистки можно оценить лишь временем достижения какого-либо заданного значения эффективности в долях от предельной. Будем применять для характеристики скорости процесса очистки параметр  $T_{95}$  — время достижения эффективности, равной 95% предельной ( $\eta = 0,95\eta_\infty$ ). В дальнейшем для краткости будем называть параметр  $T_{95}$  временем 95%-го осаждения или просто временем осаждения пыли.

Интересуясь, как и при выводе формулы (20), временем осаждения только за счет электрической фильтрации, т. е., считая, что к моменту включения электрофильтра концентрация аэрозоля равна  $n_\infty$ , после ряда преобразований получим

$$T_{95} = \frac{1}{\sqrt{D}} \ln \frac{b + 39\sqrt{D} + \frac{2ad}{N}}{b + \sqrt{D + \frac{2ad}{N}}}. \quad (21)$$

Представляет интерес рассмотрение вопроса сравнительной оценки эффективности системы вентиляции и электрической фильтрации при обеспыливании воздушной среды птицеводческого помещения.

За критерий сравнительной оценки эффективности обеспыливающей способности систем вентиляции и электрической фильтрации воздушной среды птицеводческого помещения примем относительный коэффициент  $\alpha$ , который определяется как

$$\alpha = \frac{K_{II}}{K_B}, \quad (22)$$

где  $K_B$  — количество воздуха, которое необходимо подать в помещение вентиляцией для достижения уровня ПДК пыли за 1 ч, м<sup>3</sup>/ч;  $K_{II}$  — количество воздуха, которое потребовалось бы подать в помещение системой вентиляции для удаления такого же количества пыли, которое осаждали на электродах электрофильтра за 1 ч, м<sup>3</sup>/ч [4].

Физическое толкование относительного коэффициента  $\alpha$  заключается в следующем. Производится оценка эффективности обеспыливающей способности системы вентиляции и электрической фильтрации при обеспечении удаления одинакового количества пыли из воздушной среды птицеводческого помещения за единицу времени путем сравнения абсолютных величин потребного воздухообмена.

Зная массу пыли, осажженной на электродах электрофильтра  $L$ , мг, за время опыта  $t$ , можно рассчитать количество удаляемой пыли при использовании электрофильтра за единицу времени по формуле

$$X = L / t. \quad (23)$$

В соответствии с формулой (23) определим потребный воздухообмен при использовании системы вентиляции, который необходим для удаления такого же количества пыли за равный промежуток времени как

$$K_B = \frac{X_I}{q_{ПДК} - q_{н.в}}. \quad (24)$$

Для расчета условного воздухообмена, необходимого для удаления пыли при работе электрофильтра, рассуждаем следующим образом. Если количество пыли  $L$ , осажженной на электродах электрофильтра, разделить на установившееся значение концентрации пыли в птицеводческом помещении  $q_\Phi$ , то получим объем помещения  $V$ , а затем разделим этот объем на время работы электрофильтра  $T_{95}$ , то получим формулу

$$K_{II} = \frac{L}{T_{95} q_\Phi}. \quad (25)$$

Эта формула по физическому смыслу сопоставима с выражением (24), что позволяет произвести расчет эффективности обеспыливающей способности электрофильтра.

Из приведенных зависимостей следует, что на эффективность пылеудаления оказывают наиболее существенное влияние конструктивные пара-

метры и форма электрода, расстояние между электродами, а также величина приложенного напряжения к системе «коронирующий—осадительный» электродов.

В связи с тем, что пыль птицеводческих помещений представляет собой сложную по физическому составу аэродисперсную систему, различные компоненты которой имеют существенные отличия по величине УЭС, коэффициентам шероховатости частиц пыли, а также представляет затруднение производить выполнение необходимых расчетов с приемлемой точностью замеры таких величин, как  $l$  — средняя длина пробега молекулы воздуха до столкновения с частицей пыли;  $r$  — радиус частиц пыли;  $n_c$  — средняя концентрация ионов в помещении (это отмечают, в частности, Н.В. Ксенз, Ф.Я. Изаков, В.Б. Файн), то для

отработки рациональных параметров электрофильтра отдается предпочтение экспериментальным методам, учитывающим случайный характер явления.

#### Список литературы

1. Шкрабак, В.С. Безопасность жизнедеятельности в сельскохозяйственном производстве: учебник для вузов / В.С. Шкрабак, А.В. Луковников, А.К. Тургиев. — М.: Колос, 2002. — 512 с.
2. Вальдберг, А.Ю. Технология пылеулавливания / А.Ю. Вальдберг, Л.М. Исянов, Э.Я. Тарат. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. — 192 с.
3. Самсонов, В.Т. Об изучении на моделях явления пылеобразования при падении пылящих материалов / В.Т. Самсонов // Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС. — М.: Профиздат, 1964. — № 6. — 24 с.
4. ГОСТ 4.125–84. Оборудование газоочистное и пылеулавливающее. Номенклатура основных показателей. — М.: Изд-во стандартов, 1986. — 2 с.

УДК 546.26

*К.М. Шалмагамбетов, канд. хим. наук*

Актюбинский государственный университет имени К. Жубанова

## РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПАРНИКОВОГО ЭФФЕКТА

Становятся явными признаки глобального потепления поверхности Земли вследствие накопления в ее атмосфере парниковых газов ( $\text{CO}_2$ , фреоны, метан,  $\text{NO}_x$ , озон), большая доля которых приходится на диоксид углерода (~50%). Хотя нет точных данных о величине «вклада»  $\text{CO}_2$  в парниковый эффект, связь между увеличением парникового эффекта и прогрессирующим накоплением диоксида углерода в атмосфере установлена однозначно. В мае 1992 г. 143 страны подписали в Рио-де-Жанейро соглашение о контроле за глобальным потеплением и об уменьшении выбросов  $\text{CO}_2$  в атмосфере.

Проблема уменьшения выбросов  $\text{CO}_2$  в атмосферу тесно связана с проблемой потребления энергии. Потребляемая в мире энергия удовлетворяется за счет следующих основных источников: сгорание ископаемого топлива (уголь, нефть, природный газ), ядерная энергия, солнечная энергия, подземное тепло (геотермальная вода), энергия ветра и гидроэнергия. В настоящее время около 80% всей добываемой энергии вырабатывается при сгорании ископаемого топлива. Так как потребление энергии постоянно растет в ускоренном темпе, а при сгорании топлива выделяется  $\text{CO}_2$ , концентрация последнего в атмосфере устойчиво растет приблизительно с 1850 г. Кроме сгорания ископаемого топлива крупным промышленным эмиттером диоксида углерода является производство цемента.

Антропогенный годовой выброс диоксида углерода оценивается в ~8 Гт в расчете на углерод (8 ГтС/год) [1]. Из них 6 ГтС приходится сгорание ископаемого топлива, а 2 ГтС — на обезлесение. Это намного меньше по сравнению с естественным ежегодным оборотом углерода в атмосфере и обратно (~200 ГтС) в природном углеродном цикле. Однако постоянное ежегодное прибавление 8 ГтС диоксида углерода достаточно, чтобы нарушить установившийся баланс.

Предполагается, что в среднем 57% от выделенного диоксида углерода удерживается в атмосфере. Подсчитано, что концентрация диоксида углерода в атмосфере увеличилась с 270 в прединдустриальной эре до ~338,6-миллионной доли в 1980 г. Прогнозируется, что в 2030 г. она может достичь значения 600, а в 2060 г. — 1600-миллионной доли [2]. По некоторым расчетам с 1950 по 1973 г. рост промышленного выброса ежегодно составлял ~4,3...4,5%. С 1973 г. ежегодный темп роста выброса  $\text{CO}_2$  составлял ~2,25%. В зависимости от уровня развития промышленные выбросы  $\text{CO}_2$  разных стран сильно различаются. На 1980 г. это различие выглядело следующим образом: Северная Америка (США и Канада) — 6,7%, СССР и Восточная Европа — 4,2%, Западная Европа — 16,6%, Япония и Австралия — 5,8%, развивающиеся страны — 12,2%. Наиболее крупным эмиттером диоксида углерода остаются США, которые в настоящее время поставляют в атмосферу ~20% всех выбросов ди-