

## **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДВИЖЕНИЯ ПЫЛЕВЫХ АЭРОЗОЛЕЙ**

**Киреева Н.С., кандидат технических наук, доцент**  
**Салахутдинов И.Р., кандидат технических наук, доцент**  
**Киреев А.В., магистрант, тел. 8(8422) 55-95-90, Kireeva.23@mail.ru**  
**ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ**

*Ключевые слова:* частица, пыль, закон, воздух, формула, аэрозоль.

*В работе приведены дифференциальные уравнения движения частиц пылевых аэрозолей, а также законы, определяющие сопротивление движению частиц в покоящемся воздухе, применение которых облегчает их интегрирование и не может привести к серьезным ошибкам при расчетах*

Воздушная среда промышленных площадок агропромышленного комплекса является составной частью атмосферы - одного из основных компонентов окружающей среды, в которой они взаимосвязаны сложными биохимическими циклами миграции вещества и энергии, которые характеризуются разнообразными пылевыделениями, интенсивно загрязняющими воздух рабочих зон, что является одной из основных причин возникновения профессиональных заболеваний органов дыхания.

Основная цель комплексной оценки состояния воздушной среды заключается в установлении определенного взаимного соответствия между многообразными потребностями и видами хозяйственной деятельности общества и требованиями защиты здоровья людей. Кардинальным моментом системного подхода к исследованию факторов пылевого загрязнения воздушной среды является определение взаимодействующих в этом процессе объектов как динамически развивающихся систем. Кроме того, воздух рабочей зоны представляет интерес для исследований потому, что именно в нем зарождаются и протекают основные процессы, влияющие на степень загрязнения воздуха - одного из главных источников жизнедеятельности [1].

Анализ основных свойств и особенностей производственной воздушной среды как подсистемы единого экологического комплекса позволяет заключить, что качество воздуха рабочей зоны во многом определяется наличием в нем и характеристиками загрязняющих веществ.

Наряду с другими вредными примесями, входящими в состав загрязняющих веществ, особую опасность представляет пылевой аэрозоль. При

этом характерные свойства пылевого аэрозоля наносят не только социальный, но и экономический ущерб в широких масштабах.

К основным причинам развития интенсивных процессов пылевыделения и распространения пылевого аэрозоля на предприятиях агропромышленного комплекса следует отнести:

- выдувание пыли вентиляционной струей и ее распространение по всей территории предприятия;
- выдувание пыли естественными ветровыми потоками и ее распространение в условно изолированном объеме (в кормоцехе, зерноскладах, помещениях животноводства и птицеводства и т.п.), при производстве продукции;
- выдувание пыли внутренними воздушными потоками (принудительного и естественного характера) и ее распространение во внутреннем объеме производственных помещений [2].

Важнейшей задачей вентиляционной техники является снижение концентрации пылевого аэрозоля до значений ПДК путем совершенствования очистки воздуха, удаляемого из производственных помещений с помощью вытяжных вентиляционных систем. Весьма актуальными стали также мероприятия по устранению последствий запыленности воздуха в производственных помещениях. Техника обеспыливания, т.е. очистка воздуха от пылевых частиц, характеризуется большим разнообразием конструкций и форм исполнения обеспыливающего оборудования. Правильное применение средств техники обеспыливания воздуха приобретает особое значение в современных условиях растущего загрязнения атмосферы [1].

Многообразие известных научно-методических подходов к изучению параметров пылевого аэрозоля обусловлено многообразием параметров, характеризующих его свойства в различных окружающих условиях. Однако известные подходы можно объединить по трем основным направлениям исследований пылевого аэрозоля:

1. Рассмотрение пылевых частиц как дискретных материальных тел, подчиняющихся законам Ньютона. Такой подход учитывает газообразную фазу как отдельную физическую систему по отношению к системе пылевых частиц, что не позволяет описать существенные "внутренние" эффекты взаимодействия газообразной среды и твердой фазы как элементов единой системы.
2. Рассмотрение пылевого аэрозоля как сплошной среды, подчиняющейся законам идеальных жидкостей и газов, с наличием в ней посторонних примесей (пылевых частиц). И в этом случае общая картина получается

односторонней, так как не учитывает в полной мере свойства пылевых частиц как дискретных тел.

3. Рассмотрение пылевого аэрозоля, как дисперсной системы, что позволяет максимально учесть положения теории сплошных сред и теории дискретных материальных тел на базе классических аспектов теории дисперсных систем [3].

Одним из важнейших результатов взаимодействия пылевых частиц, с увлекающими их воздушными потоками при наличии внешних сил, являются силы инерции, имеющие большое значение в теории и практике обеспыливания.

Частицы аэродисперсных систем постоянно движутся относительно среды и друг друга. В зависимости от размеров частиц, составляющих одну и ту же полидисперсную пыль, меняются законы, определяющие сопротивление движению частиц в покоем воздухе или, также, сопротивление неподвижных частиц прямолинейному потоку воздуха.

Например, движение очень мелких частиц размером до нескольких десятков миллиметров (субмикронных), невидимых в обычном оптическом микроскопе, не нарушает распределение скоростей молекул воздуха и не создает в нем никаких течений. В этом случае сопротивление движению обуславливается только тем, что движущаяся частица подвергается спереди большему числу ударов молекул, чем сзади. Соответственно этому сопротивление пропорционально скорости частиц и площади поперечного сечения, т. е. квадрату диаметра частиц [4].

$$F = \frac{3 \cdot \pi \cdot \mu_B \cdot d^2 \cdot V_c}{K_{OT} \cdot l} \quad (1)$$

где  $\mu_B$  - вязкость воздуха (Па·с);  $d$  – диаметр частиц (мм);  $V_c$  - скорость движения частицы относительно среды (м/с);  $K_{OT}$  - параметр, зависящий от механизма отражения молекул;  $l$  - средняя длина свободного пути молекул (мм).

Движение частицы размером 1 мкм и более создает в воздухе течения, обуславливающие аэродинамическое сопротивление ему. В аэродинамике при равномерном движении это сопротивление выражают формулой

$$F = \psi \frac{\pi \cdot d^2}{4} \rho_B \frac{v^2 \cdot c}{2} \quad (2)$$

где  $\psi$  - коэффициент аэродинамического сопротивления, зависящий от числа Рейнольдса  $Re$ ;  $d$  – диаметр частиц (мм);  $\rho_B$  - плотность воздуха ( $г/см^3$ );  $v$  – скорость потока воздуха (м/с);  $c$  – уточняющий коэффициент.

Частицы этого размера различают с помощью оптического микроскопа, а более крупные - невооруженным глазом. Для малых и постоянных скоростей движения и небольших размеров частиц, когда  $0 < Re < 1$ , коэффициент аэродинамического сопротивления  $\Psi$  принимают равным  $24/Re$  и сопротивление определяют по формуле Стокса [4]:

$$F = 3\pi \cdot \mu_B \cdot d \cdot v_c \quad (3)$$

где  $\mu_B$  - вязкость воздуха (Па·с);  $d$  - диаметр частиц (мм);  $v_c$  - скорость движения частицы относительно среды (м/с).

Сила  $F$  в данном случае складывается из двух компонентов. Один из них представляет собой равнодействующую нормальных сил, т. е. сил давления воздуха на сферу, и равен  $\pi d^2 v_c^2$ , другой - соответственно равнодействующую касательных напряжений, т. е. силу трения воздуха о поверхность сферы, и равен  $2\pi d v_c$ .

Применение формулы Стокса облегчает интегрирование дифференциальных уравнений движения частиц и не может привести к серьезным ошибкам также и в более широком диапазоне значений числа  $Re$ , поскольку обычно исследуются явления, связанные с движением наименьших из частиц системы, которые еще более или менее эффективно сепарируются из потока. Это обуславливает широкое применение формулы Стокса при исследовании вопросов, связанных с движением пылевых частиц в воздухе.

Формула Стокса получена в предположении, что силы инерции воздуха, вытесненной частицей, пренебрежимо малы. В литературе встречается также формула Озеена, полученная с частичным учетом инерционных членов уравнения Навье - Стокса. Согласно Озеену:

$$\psi = \frac{24}{Re} \left( 1 + \frac{3}{16} Re \right) \quad (4)$$

где  $Re$  - число Рейнольдса.

Считают, что формула (4) может применяться до значений  $Re=5$ .

В тех случаях, когда исследуется движение, характеризующееся заведомо большими значениями числа  $Re$  и широким интервалом его изменения, применяют формулу Клячко:

$$\psi = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re}} \quad (5)$$

В интервале  $3 < Re < 400$  эта формула дает погрешность не более 2%, при  $Re = 1000$  погрешность составляет около - 4%, а при  $Re = 0,1$  - около +4%.

При больших значениях числа  $Re$  большая часть сопротивления создается давлением воздуха на поверхность частиц и только небольшая часть - поверхностным трением. Сопротивление изменяется пропорционально  $v_c^2$

где  $\lambda$  непрерывно возрастает с увеличением  $Re_e$ , приближаясь к двум (формула (2)). Для очень больших значений числа  $Re_e$  сопротивление определяется формулой Ньютона [4]:

$$F = 0,055 \cdot \pi \cdot \mu_B \cdot d^2 \cdot v_c^2 \quad (6)$$

что соответствует значению  $\Psi = 0,44$ .

При инженерных расчетах по приведенным формулам принимают, что частицы представляют собой идеальные сферы, учитывая в отдельных случаях влияние действительной формы частиц и строение их поверхности. Обычно для этого вводят в формулу Стокса диаметр эквивалентной частицы - частицы, которая оседает с той же скоростью, что и рассматриваемая, или динамический коэффициент формы, равный отношению сопротивления среды движению частицы неправильной формы и сферической частицы того же объема.

Характерной особенностью несферических частиц является их стремление принять при движении такое положение, при котором сопротивление среды было бы максимальным. Частицы пластинчатой, многогранной и игольчатой форм располагаются так, что их более развитые грани и более длинные ребра оказываются перпендикулярными направлению движения. Такая ориентация усиливается, по мере увеличения значения числа  $Re_e$ . Одновременно увеличивается угол, между направлением движения и направлением силы сопротивления, траектория оседающих частиц отклоняется от вертикали, причем тем больше, чем крупнее частицы. При достаточно больших значениях числа  $Re_e$  движение становится спиральным или зигзагообразным, некоторые частицы скользят вбок, парят. При медленном оседании мелких частиц ( $r < 10$  мкм) это явление не отмечается.

В инженерных расчетах обычно не учитывают влияние стенок, ограничивающих объем, в котором движется частица, и турбулентности на сопротивление движению. Точных данных по этому вопросу не имеется - можно полагать, что при небольших значениях числа  $Re_e$  турбулентность не оказывает существенного влияния.

#### **Библиографический список**

1. Татаров, Л.Г. Обеспыливание воздуха электрофильтром/Л.Г. Татаров, С.В. Стрельцов, Н.С. Киреева, О.М. Каняева//Научное обозрение. - 2016. - № 8. - с. 110 – 114.
2. Логачев, И.Н. Аэродинамические основы аспирации/ И.Н. Логачев, К.И. Логачев//Спб.: «Химиздат». - 2005. - 659 с.

3. Беспалов, В. И., Теория и практика обеспыливания воздуха/ В.И. Беспалов, Д.С. Данельянц, Й Мишнер// М.: МП «КНИГА», - 2000. - 190с.

4. Грабовский Р. И. Курс физики. Спб. : «Лань», - 2005. - 608 с.

## THE MOTION OF THE PARTICLES IN DISPERSE SYSTEMS

**Kireeva N.S., Salakhutdinov I.R., Kireev A.V.**

**Key words:** *particle, dust, law, air, formula, aerosol.*

*The paper presents the differential equations of particle motion, as well as the laws determining the resistance of particles to motion in the resting air, the application of which facilitates their integration and can not lead to serious errors in the calculations.*