

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА КОНВЕКТИВНОЙ ДИФФУЗИИ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ

О.Б. Кудряшова, Н.В. Коровина, А.А. Антонникова, И.К. Жарова

Работа посвящена экспериментальному определению коэффициента конвективной диффузии частиц аэрозолей с характерными размерами, порядка десятков микрометров и менее на основе физико-математической модели распространения аэрозоля в пространстве замкнутых помещений. Физико-математическая модель учитывает процессы начального разлета частиц при торможении их в воздухе, формирование первичного облака и дальнейшего диффузионного распространения. Приводятся экспериментальные результаты, полученные с помощью оптических методов измерений концентрации частиц модельных аэрозолей (порошка псевдобемита и косметической глины), при обработке которых получены искомые значения коэффициента конвективной диффузии.

Ключевые слова: мелкодисперсный аэрозоль, конвективная диффузия, пожаровзрывоопасность.

ВВЕДЕНИЕ

В технологических процессах – при дроблении и размоле зерна, при добыче каменного угля и т.п. образуются аэрозоли – системы, состоящие из твердых частиц, распределенных в газовой среде. Аэрозоли указанных материалов обладают характерными размерами частиц, порядка 100–300 мкм и менее (пыли). Пыли потенциально опасны с точки зрения возможности пожара и взрыва при достижении определенной концентрации частиц в воздухе и других условий (температуры, влажности) [1]; кроме того, они представляют экологическую опасность при вдыхании их человеком и животными [2]. Статистика производственных аварий показывает, что число пожаров и взрывов промышленных пылей продолжает оставаться значительным.

В связи с этим на производстве предпринимаются меры, нацеленные на предотвращение образования аэрозолей. Однако, при нарушении технологического процесса возможны утечки порошковых материалов и образование газодисперсных систем, распространяющихся в пространстве.

Критическим параметром, от которого зависит экологическая и пожаровзрывная опасность пыли, является концентрация частиц в воздухе. Концентрация частиц, в свою очередь, зависит от скорости создания аэрозольного облака, скорости осаждения частиц, диффузии, свойств частиц и окружающей среды, параметров внешних воздействий. Важной задачей, следовательно, является предсказание эволюции пылевого облака в пространстве и расчет концентрации частиц в пространстве помещения.

При распространении аэрозолей в пространстве замкнутого производственного помещения ведущим механизмом является конвективная диффузия [3]. Эволюции мелкодисперсных аэрозолей в пространстве помещений посвящена работа авторов [4]. В работе [5] предложена физико-математическая модель распространения частиц аэрозоля с характерными размерами, порядка 15 мкм, в пространстве и экспериментально определен коэффициент конвективной диффузии при распылении жидкости. На практике более важно рассмотреть порошковые аэрозоли.

Цель работы – на основе физико-математической модели конвективно-диффузионного распространения частиц определить коэффициент диффузии для модельных мелкодисперсных порошковых аэрозолей различной плотности. Результаты могут быть использованы для оценки концентрации частиц мелкодисперсных твердофазных аэрозолей в производственных помещениях.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Приняты следующие допущения.

1. Частицы аэрозоля имеют сферическую форму и одинаковый радиус r_p .
2. Облако частиц формируется в результате выброса из точечного источника известной массы частиц аэрозоля m_0 с известной начальной скоростью U_{p0} .
3. После торможения частиц в воздухе образуется облако сферической формы с радиусом r_0 . Дальнейшее распространение частиц в пространстве происходит за счет процесса конвективной диффузии.
4. Время разлета частиц много меньше

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА КОНВЕКТИВНОЙ ДИФфуЗИИ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ

времени диффузионного распространения.

5. Пространство считается однородным и бесконечным.

6. Коэффициент конвективной диффузии не зависит от направления движения частиц и является константой задачи, которую надо определить экспериментально.

В работе [5] получены выражения для скорости торможения u_p частицы аэрозоля с начальной скоростью u_{p0} в воздухе, времени торможения и пути, пройденного частицей до полной остановки r_0 . Скорость движения частицы определяется из уравнения движения с учетом коэффициента сопротивления при торможении в воздухе:

$$u_p(t) = \begin{cases} u_{p0} \exp\left(-\frac{9}{2} \frac{\mu}{r_p^2 \rho_p} t\right), & \text{Re} < 1; \\ \frac{3\sqrt{6}\mu}{\rho_p r_p} \left[\left(1 + \frac{6}{\text{Re}_0^3}\right) \exp\left(\frac{3\mu}{\rho_p r_p^2} t\right) - 1 \right]^{\frac{3}{2}}, & 1 \leq \text{Re} < 900; \\ u_{p0} \left(1 + 0,165 \frac{\rho u_{p0}}{\rho_p r_p} t\right)^{-1}, & \text{Re} > 900 \end{cases}, \quad (1)$$

где $\text{Re}_0 = \frac{2r_p \rho u_{p0}}{\mu}$ – значение числа Рей-

нольдса в момент времени $t = 0$, ρ_p , ρ – плотность жидкости и воздуха соответственно; u_p – скорость частицы, μ – динамический коэффициент вязкости воздуха.

Расстояние r_0 , пройденное частицей, определяется интегрированием уравнений (1):

$$r_0 = \int_0^{t_*} u_p(t) dt. \quad (2)$$

Время начального разлета частиц определится из условия $u_p \rightarrow 0$ при $t \rightarrow t_*$.

После первичного разлета и остановки за короткое время (доли секунды) происходит более медленный процесс диффузионного распространения частиц. В сферическом приближении задачу о диффузии аэрозоля можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{D}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial c}{\partial r} \right), \quad (3)$$

с начальными и граничными условиями:

$$t=0, c=c_0 \text{ при } r < r_0; c=0 \text{ при } r > r_0,$$

$$r=0: \frac{\partial c}{\partial r} = 0; \quad r \rightarrow \infty: \frac{\partial c}{\partial r} = 0,$$

где c_0 – массовая концентрация в первичном

облаке радиусом r_0 , который вычисляется при решении задачи о разлете частиц,

$$c_0 = \frac{3m_0}{4\pi r_0^3}, \quad r - \text{радиальная координата, } t -$$

время; D – коэффициент диффузии; m_0 – масса частиц аэрозоля.

Решение уравнения диффузии имеет следующий вид:

$$C = \frac{1}{2} \left\{ \text{erfc} \left(\frac{r-r_0}{2\sqrt{Dt}} \right) - \frac{2}{r} \sqrt{\frac{Dt}{\pi}} \exp \left[-\frac{(r-r_0)^2}{4Dt} \right] - \text{erfc} \left(\frac{r+r_0}{2\sqrt{Dt}} \right) + \frac{2}{r} \sqrt{\frac{Dt}{\pi}} \exp \left[-\frac{(r+r_0)^2}{4Dt} \right] \right\}, \quad (4)$$

где $C(r,t) = c/c_0$ – безразмерная концентрация.

Выражение (4) задает изменение концентрации частиц аэрозоля во времени и в пространстве. Единственным неизвестным параметром задачи является коэффициент конвективной диффузии. В отличие от коэффициента броуновской диффузии, которая реализуется в идеальных условиях отсутствия конвективных потоков, коэффициент конвективной диффузии невозможно определить теоретически. Поэтому его необходимо найти экспериментально.

Можно ожидать, что, помимо размеров частиц, на процесс их диффузионного распространения будет оказывать влияние плотность порошка. Поэтому в качестве модельных материалов были выбраны мелкодисперсные порошки существенно разной плотностью: псевдобемит (гидроксид алюминия) с плотностью $\rho_p = 2420 \text{ кг/м}^3$ и косметическая глина с плотностью $\rho_p = 1600 \text{ кг/м}^3$. Радиус частиц порошков составлял, приблизительно, 20–25 мкм.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для измерения характеристик облака частиц использовалась экспериментальная установка, схема которой приведена на рисунке 1.

В замкнутой камере 1 размером (2×1×1) м установлен распылитель (пескоструй) 2. Структура факела распыла, концентрация и дисперсность частиц порошка определялись с использованием бесконтактных оптических методов. Концентрация и функция распределения частиц по размерам измерялись методами малых углов индикатрисы рассеяния и спектральной прозрачности [6]. Излучение зондирующего лазера 3 через систему зеркал 4 и оптические окна 5, установленные в камере 1, после взаимодействия с аэрозольным облаком поступает на приемники излучения 6, расположенные на расстояниях

$r = 0,4 \text{ м}, r = 1 \text{ м}, r = 1,8 \text{ м}$ от генератора 2.

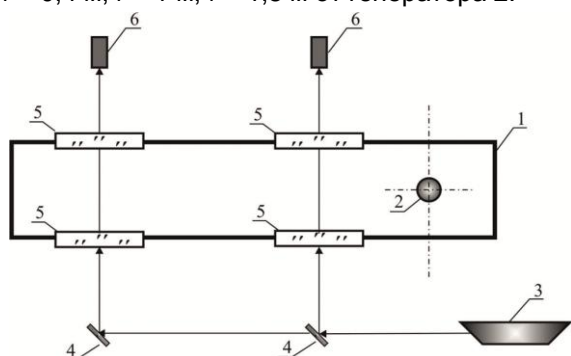


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунках 2 и 3 приведены значения массовой концентрации частиц порошка косметической глины (точки на графике) в зависимости от времени для двух значений расстояния от распылителя, полученные в результате измерений методом спектральной прозрачности.

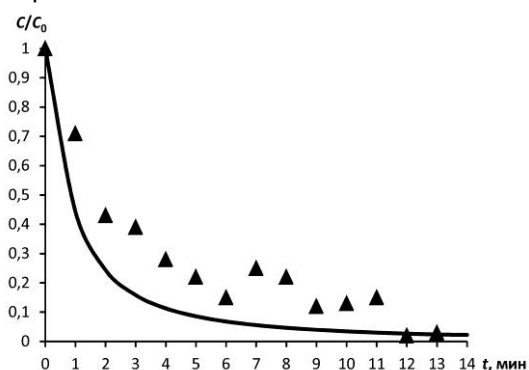


Рисунок 2 – Зависимость концентрации частиц порошка косметической глины от времени: сплошные линии – расчет по уравнению (4), точки – экспериментальные данные (а). Расстояние от распылителя $r = 1 \text{ м}$

Массовая концентрация частиц C приведена в безразмерном виде (отнесена к значению концентрации в первичном облаке).

На рисунке 4 приведено распределение концентрации частиц порошка косметической глины, по горизонтальной пространственной координате, расчетные кривые (выражение (4)) и экспериментальные точки. Аэрозоль (30 г) распылялся в камере, где на расстояниях 0,1; 0,4; 1 и 1,8 м от генератора проводились измерения концентрации частиц методом малоуглового рассеяния в течение 15 минут после распыления. Расчет сделан для значения коэффициента диффузии $D=0,0036 \text{ м}^2/\text{с}$. Подбор

параметра проводился путем минимизации суммы среднеквадратичных отклонений расчетных значения от экспериментальных.

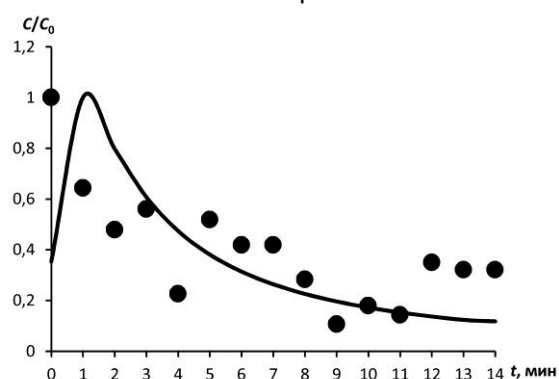


Рисунок 3 – Зависимость концентрации частиц порошка косметической глины от времени: сплошные линии – расчет по уравнению (4), точки – экспериментальные данные (а). Расстояние от распылителя $r = 1,8 \text{ м}$

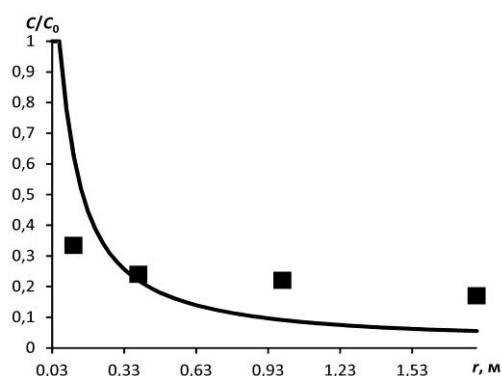


Рисунок 4 – Зависимость относительной концентрации аэрозоля глины от пространственной координаты в момент времени 5 минут. Точки – эксперимент, кривая – расчет

Как показывают и расчеты, и эксперимент по распространению аэрозоля в пространстве (с характерными размерами 1–2 м) быстро, в течение нескольких минут, устанавливается, практически, равномерное распределение аэрозоля в пространстве. Расчет удовлетворительно описывает экспериментальные данные.

Аналогично были проведены эксперименты и расчеты для порошка псевдобемита, обладающего большей плотностью ($\rho_p=2420 \text{ кг/м}^3$), чем порошок глины ($\rho_p=1600 \text{ кг/м}^3$), но с теми же средними размерами частиц ($r_p \sim 20\text{--}25 \text{ мкм}$). На рисунке 5 приведена зависимость относительной концентрации аэрозоля псевдобемита от пространственной координаты в момент времени 5 минут.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА КОНВЕКТИВНОЙ ДИФфуЗИИ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ

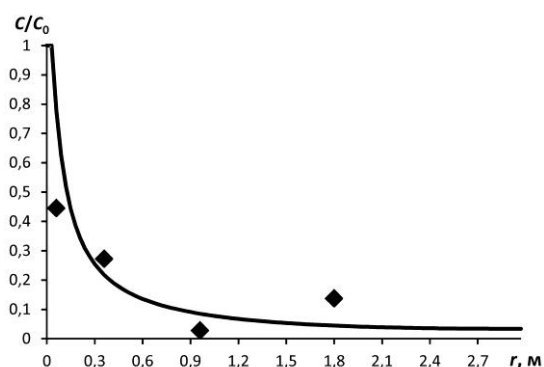


Рисунок 5 – Зависимость относительной концентрации аэрозоля псевдобемита от пространственной координаты в момент времени 5 минут. Точки – эксперимент, кривая – расчет

Расчет сделан при величине коэффициента диффузии, равном $0,0055 \text{ м}^2/\text{с}$. Величина параметра подобрана путем минимизации суммы среднеквадратичных отклонений экспериментальных значений от расчетных в соответствии с математической моделью, приведенной выше.

Таким образом, экспериментальным путем установлены значения коэффициента конвективной диффузии частиц аэрозоля глины и псевдобемита с характерным радиусом частиц $r_p \sim 25 \text{ мкм}$. Значения коэффициента конвективной диффузии получились следующие: для глины $0,0036 \text{ м}^2/\text{с}$, для псевдобемита $0,0055 \text{ м}^2/\text{с}$.

Коэффициент броуновской диффузии взвешенных в воздухе частиц определяется соотношением Эйнштейна–Смолуховского [7]:

$$D_b = \frac{kT}{6\pi\mu r_p}, \quad (5)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура.

Для частиц радиусом $r_p = 25 \text{ мкм}$ коэффициент броуновской диффузии, согласно (5), имеет порядок $D_b \sim 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$. При этом значении коэффициента диффузии за время порядка нескольких часов аэрозольное облако не распространилось бы заметно от источника, что противоречит результатам измерений. Следовательно, преобладающим механизмом распространения облака является конвективная диффузия.

Величина коэффициента конвективной диффузии для мелкодисперсных порошковых аэрозолей с разной плотностью имеет порядок величины $D \sim 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$. Этот экспериментальный результат совместно с формулой (4) можно использовать для оценок концентрации пыли в производственных помещениях.

ВЫВОДЫ

1. Разработана лабораторная установка и проведены измерения оптическими методами дисперсного состава и концентрации частиц порошковых аэрозолей в замкнутом пространстве.

2. Предложена математическая модель эволюции облака частиц в замкнутом объеме, включающая две стадии – образование первичного облака и распространение его за счет конвективной диффузии.

3. Получено аналитическое решение уравнения диффузии для аэрозольного облака конечных размеров. На основании параметрических расчетов и сравнения с экспериментальными данными получено эффективное значение коэффициента конвективной диффузии для модельных порошковых аэрозолей различной плотности $D = (3,6 \div 5,5) \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ в замкнутом пространстве.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ мол_нр № 15-38-50660.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корольченко, А. Я. Пожаровзрывоопасность промышленной пыли / А. Я. Корольченко. – М.: Химия, 1986. – 216 с.
2. Пирумов, А. И. Обеспыливание воздуха / А. И. Пирумов. – М.: Стройиздат, 1981. – 242 с.
3. Фукс, Н. А. Механика аэрозолей / Н. А. Фукс. – М.: Изд.-во Академии наук, 1955. – 352 с.
4. Кудряшова, О. Б. Влияние физико-химических свойств распыляемого вещества на эволюцию мелкодисперсного аэрозоля / О. Б. Кудряшова, Н. В. Коровина, А. А. Антонникова, Б. И. Ворожцов // Ползуновский вестник. – 2013. – № 3. – С. 114–117.
5. Кудряшова, О. Б. Распространение аэрозольного облака в замкнутом пространстве / О. Б. Кудряшова, Н. В. Коровина, А. А. Павленко, В. А. Архипов, В. Д. Гольдин, Е. В. Муравлев // Инженерно-физический журнал. – 2015, Т. 88, № 3. – С. 552–559.
6. O. Kudryashova, A. Pavlenko, B. Vorozhtsov, S. Titov, V. Arkhipov, S. Bondarchuk, E. Maksimenko, I. Akhmadeev, E. Muravlev Remote optical diagnostics of nonstationary aerosol media in a wide range of particle sizes. In book: Photodetectors. Rijeka, Croatia: InTech, 2012. – P. 341–364.
7. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1986. – 736 с.

Кудряшова О.Б. – д. ф.-м. н., доцент, с.н.с., ИПХЭТ СО РАН, olgakudr@inbox.ru, +79059245444.

Коровина Н.В. – к. ф.-м. н., м.н.с., ИПХЭТ СО РАН, korovina.nata@mail.ru.

Антонникова А.А. – к. ф.-м. н., м.н.с., ИПХЭТ СО РАН, antonnikova.a@mail.ru.

Жарова И.К. – д. ф.-м. н., в.н.с., НИИ ПММ ТГУ, zharova@niipmm.tsu.ru.