

Таблица 1 – Время полного испарения аэрозоля в зависимости от влажности и температуры среды

Влажность, %	Температура, °С	Время испарения, с	
		эксперимент	расчет
70	45	60	75
60	22	170	150
90	15	190	190

Таким образом, в работе проведено исследование испарения мелкодисперсных водных аэрозолей, с характерным диаметром частиц, порядка единиц микрометров. Показано, что с ростом влажности и понижением температуры время испарения капель аэрозоля увеличивается в несколько раз. Предложенная физико-математическая модель испарения полидисперсного водного аэрозоля, учитывающая ускорение тепломассопереноса с более развитой поверхности капель, удовлетворительно описывает экспериментальные данные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pavlenko A., Kudryashova O., Vorozhtsov B., Titov S., Akhmadeev I., Muravlev E. Modified Method of Optical Diagnostics of Aerosol Media // <http://www.pim-journal.org/paperInfo.aspx?ID=12>. – Precision Instrument and Mechanology. – 2012. – Vol. 1, No. 1. – ID12.
2. Пат. 2441218 RU, МКИ G01N 15/02. Способ определения дисперсности и концентрации частиц в аэрозольном облаке / В.А. Архипов, А.А. Павленко, С.С. Титов, О.Б. Кудряшова, С.С. Бондарчук. – № 2010143653; заявлено 25.10.2010; опубл. 27.01.2012, Бюл. № 3. – 10 с.
3. А.А. Антонникова, Н.В. Коровина, О.Б. Кудряшова, И.М. Васенин. Физико-математическая

модель испарения капель мелкодисперсных аэрозолей // Ползуновский вестник. – 2013. – № 1. – С. 129-132.

Антонникова Александра Александровна, младший научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН). E-mail: antonnikova.a@mail.ru. Ул. Социалистическая, 1, г. Бийск, Россия. Тел. (3854) 30-18-69.

Коровина Наталья Владимировна, младший научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), E-mail: korovina.nata@mail.ru. Ул. Социалистическая, 1, г. Бийск, Россия. Тел. (3854) 30-18-69.

Кудряшова Ольга Борисовна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), E-mail: olgakudr@inbox.ru. Ул. Социалистическая, 1, г. Бийск, Россия. Тел. (3854) 30-18-69.

Ворожцов Борис Иванович, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН). E-mail: olgakudr@inbox.ru Ул. Социалистическая, 1, г. Бийск, Россия. Тел. (3854) 30-58-65.

УДК 544.772.3:519.87

ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАСПЫЛЯЕМОГО ВЕЩЕСТВА НА ЭВОЛЮЦИЮ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО АЭРОЗОЛЯ

О.Б. Кудряшова, Н.В. Коровина, А.А. Антонникова, Б.И. Ворожцов

Работа посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию эволюции дисперсных параметров и концентрации аэрозолей с характерными размерами частиц (порядка единиц, десятков микрометров и менее) и влиянию физико-химических свойств вещества на процессы испарения и осаждения частиц. Физико-математическая модель учитывает процессы седиментации, испарения, коагуляции частиц (на основе балансовых уравнений Смолуховского). Приводятся экспериментальные результаты, полученные с помощью оптических методов измерений дисперсных и концентрационных характеристик аэрозолей.

Ключевые слова: мелкодисперсный аэрозоль, гамма-распределение, модель Смолуховского.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в связи с требованиями экологической безопасности, пожаротушения, а также с развитием нанотехнологий возрастает интерес к аэрозолям с характерными размерами частиц, порядка микрометров и менее. Важным вопросом является прогнозирование поведения аэрозольных сред в зависимости от их физико-химических свойств. Сложность изучения таких сред связана с их быстрым распространением в пространстве (конвективная диффузия), для воды и летучих веществ – с высокой скоростью испарения; частицы микронных размеров не видны невооруженным глазом. Таким образом, требуется применение специальных методов измерений характеристик аэрозолей, обладающих высоким временным разрешением и возможностью измерять размеры частиц и их концентрацию в диапазоне от 1 до 100 мкм.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

При теоретическом описании кинетики мелкодисперсных облаков необходимо взаимосвязано учитывать быстрое испарение капель, обусловленное развитым теплообменом с окружающей средой и уносом энергии с относительно большой поверхности капель, а также процессы осаждения и коагуляции. В модельном аэрозоле, полученном в лабораторных условиях, распределение частиц по размерам можно считать одномодалным и соответствующим гамма-распределению (1).

$$f(D) = aD^{\alpha} \exp(-bD), \quad (1)$$

где параметры a , b , α – положительные вещественные числа. В качестве одной из важнейших статистических характеристик распределения (1) можно считать объемно-поверхностный диаметр частиц D_{32} , равный отношению $(\alpha+1)/b$.

Следуя [1, 2], запишем балансовое уравнение (интегральный вариант уравнения Смолуховского), описывающее изменение со временем функции распределения частиц по размерам в предположении пространственной однородности облака частиц:

$$\frac{\partial f(D, t)}{\partial t} = I_1 + I_2 + I_3 \quad (2)$$

где I_1 описывает убыль капель с диаметром D за единицу времени в единице объема за счет столкновения капли диаметра D с любой каплей диаметра D' :

$$I_1 = -f(D, t) \int_0^{\infty} K(D, D') f(D', t) dD' \quad (3)$$

где $K(D, D')$ – вероятность столкновения капель с диаметрами D и D' в единицу времени. Примем вероятность столкновения частиц пропорциональной их сечениям:

$$K(D, D') = b_k (D^2 + D'^2)$$

Член I_2 описывает возникновение частиц диаметра D за счет столкновения капель с диаметрами D' и $D - D'$:

$$I_2 = \frac{1}{2} \int_0^D K(D - D', D') f(D', t) f(D - D', t) dD'$$

член I_3 – уменьшение массы капель за счет их испарения.

Уравнение Максвелла описывает скорость испарения капли и имеет вид:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{2\pi D f^M (p_{drop} - p_{pl})}{RT} \quad (4)$$

где m – масса капли; D_f – коэффициент диффузии; M – молекулярный вес жидкой капли; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура; p_{drop} и p_{pl} – парциальное давление над каплей и плоской поверхностью.

Член I_3 описывает уменьшение массы частиц за счет их испарения и определяется

$$I_3 = \frac{\partial}{\partial m} \left(\frac{dm}{dt} f(D) \right) = \frac{\partial}{\partial m} \left[\frac{2\pi D f^M (p_{drop} - p_{pl}) f(D)}{RT} \right]$$

Учитывая формулу Томсона (Кельвина):

$$\ln(p_{drop} / p_{pl}) = \frac{4\sigma M}{\rho_w RTD},$$

где σ – поверхностное натяжение; ρ_w – плотность жидкости и выражая массу частицы через ее диаметр, получим:

$$I_3 = \frac{\partial}{\partial D} \left[4\pi D_f M p_{pl} \left(\exp \left(\frac{4\sigma M}{\rho_w RTD} \right) - 1 \right) \frac{f(D)}{RT \rho_w} \right]$$

Начальные условия для уравнения (2): при $t=t_0$ $f(D, t_0) = f_0(D)$ – начальное распределение частиц по размерам.

При расчете параметров аэрозоля водных растворов, содержащих слабоиспаряемое вещество (например, глицерин), необходимо учитывать изменение коэффициента диффузии молекул при изменении концентрации этого вещества в воде. В первую очередь, из раствора испаряется вода, постепенно уменьшая коэффициент диффузии вещества частицы:

$$D_f = D_{fw} \frac{C_{evp}}{1 - C_g} + D_{fg} \left(1 - \frac{C_{evp}}{1 - C_g} \right), \quad (5)$$

где D_{fw} – коэффициент диффузии молекул воды, D_{fg} – коэффициент диффузии молекул слабоиспаряемого вещества в воздухе, C_{evp} – массовая доля испарившегося вещества, C_g – начальная массовая доля слабоиспаряемого вещества в растворе.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для экспериментального подтверждения влияния физико-химических свойств вещества на процессы испарения и осаждения частиц эксперименты проводились с веществами, имеющими различные значения плотности, вязкости и поверхностного натяжения. В качестве распыляемых материалов использовались следующие вещества: подсолнечное масло, 20-процентный и 70-процентный растворы глицерина.

Эксперименты проводили следующим образом. В аэрозольную камеру, представляющую собой деревянный каркас объемом 1 м³, распыляли аэрозоль. Распыление осуществлялось инъекционным методом (краскопультом) с постоянным давлением рабочего газа 4 атм. от баллона высокого давления. Перед началом исследований аэрозоля с разными физико-химическими свойствами проводился расчет расхода жидкости, регулируя настройки распыла краскопульта так, чтобы дисперсность частиц в струе не превышала 20 мкм.

После заполнения камеры аэрозолем (масса распыленного вещества составила 20 г), с помощью установки ЛИД-2М [3] производилась регистрация изменения дисперсных параметров облака аэрозоля в камере в течение 30 минут от момента начала распыления.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве модельных сред рассмотрены подсолнечное масло и водные растворы глицерина (20, 70%). Данные вещества отличаются, прежде всего, коэффициентом диффузии молекул (для масла и глицерина он на 4-5 порядков меньше, чем для воды). Слабоиспаряемые вещества – подсолнечное масло и глицерин – образуют аэрозоль, динамика которого обусловлена, в основном, коагуляцией и осаждением. Чем больше процент воды в растворе глицерина, тем больший эффект на процессы эволюции оказывает испарение вещества частиц.

На рисунке 1 приведена относительная массовая концентрация m/m_0 (где m_0 – началь-

ная масса частиц аэрозоля), рассчитанная по приведенной выше модели (кривая) и измеренные экспериментально (точки), в зависимости от времени.

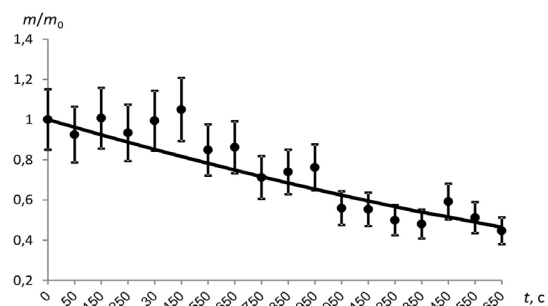


Рисунок 1 – Динамика относительной массовой концентрации частиц аэрозоля подсолнечного масла

На рисунках 2 и 3 приведены зависимости от времени относительной концентрации и среднего объемно-поверхностного диаметра частиц для аэрозолей 20-процентного и 70-процентного растворов глицерина.

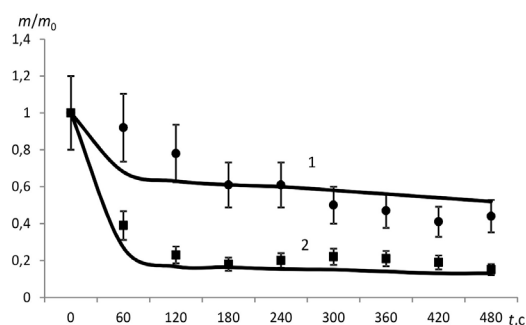


Рисунок 2 – Динамика относительной массовой концентрации частиц аэрозоля растворов глицерина: 1 – 70 % раствор; 2 – 20 % раствор

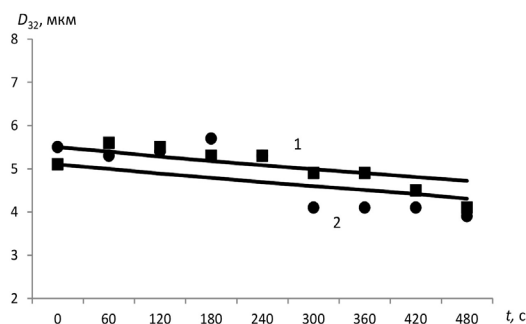


Рисунок 3 – Динамика среднего объемно-поверхностного диаметра частиц аэрозоля растворов глицерина: 1 – 70 % раствор; 2 – 20 % раствор

Наблюдается перегиб на кривой изменения концентрации аэрозоля, обусловленный испарением воды из раствора. Дальнейшее уменьшение концентрации происходит в меньшей степени за счет испарения, в большей степени за счет коагуляции и осаждения частиц.

На рисунке 4 показана массовая функция распределения частиц по размерам для раствора глицерина в начальный момент времени после распыления и в момент времени 480 с. Пик распределения смещается в сторону более малых частиц за счет испарения.

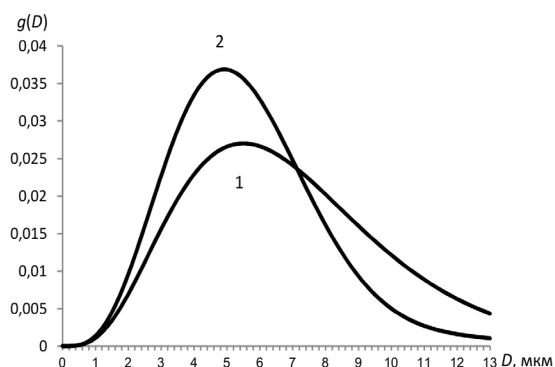


Рисунок 4 – Массовая функция распределения частиц по размерам, 20 % раствор глицерина: 1 – начальный момент времени, 2 – $t=480$ с.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в работе проведено исследование эволюции дисперсных характеристик и концентрации аэрозолей с характерным диаметром частиц, порядка единиц и десятков микрон. Показано, что определяющий механизм эволюции аэрозоля существенно зависит от физико-химических свойств вещества, прежде всего, коэффициента диффузии молекул вещества в воздухе: для веществ с низким коэффициентом диффузии эволюция аэрозоля определяется коагуляцией и осаждением частиц, в противном случае ведущим механизмом является испарение.

Предложенная физико-математическая модель, основанная на уравнении Смолуховского с учетом испарения (уравнения Максвелла, Томсона), удовлетворительно описывает экспериментальные данные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волощук В.М. Кинетическая теория коагуляции. – М.: Гидрометеиздат, 1984. – 283 с.
2. Кудряшова О.Б., Ворожцов Б.И., Антонникова А.А. Физико-математическая модель динамики функции распределения частиц по размерам с учетом процессов коагуляции, испарения и осаждения // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2012. – № 1(17). – С. 81–90.
3. Антонникова А.А., Коровина Н.В., Кудряшова О.Б., Ахмадеев И.Р., Шалунова К.В., Хмелев В.Н. Экспериментальное исследование динамики дисперсных характеристик аэрозоля при ультразвуковом воздействии // Ползуновский вестник. – 2011. – № 4–1. – С. 176–179.

Кудряшова Ольга Борисовна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН). E-mail: olgakudr@inbox.ru. Ул. Социалистическая, 1, г. Бийск, Россия. Тел. (3854) 30-18-69.

Коровина Наталья Владимировна, младший научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН). E-mail: korovina.nata@mail.ru. Ул. Социалистическая, 1, г. Бийск, Россия. Тел. (3854) 30-18-69.

Антонникова Александра Александровна, младший научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН). E-mail: antonnikova.a@mail.ru. Ул. Социалистическая, 1, г. Бийск, Россия. Тел. (3854) 30-18-69.

Ворожцов Борис Иванович, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН). E-mail: olgakudr@inbox.ru. Ул. Социалистическая, 1, г. Бийск, Россия. Тел. (3854) 30-58-65.