

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ОСАЖДЕНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО АЭРОЗОЛЯ**Антонникова Александра Александровна,**

мл. науч. сотр. лаб. 5 Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Россия, Алтайский край, 659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, д. 1. E-mail: antonnikova.a@mail.ru

Коровина Наталья Владимировна,

мл. науч. сотр. лаб. 5 Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Россия, Алтайский край, 659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, д. 1. E-mail: korovina.nata@mail.ru

Кудряшова Ольга Борисовна,

канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. лаб. 5 Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Россия, Алтайский край, 659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, д. 1. E-mail: olgakudr@inbox.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью осаждения промышленных и техногенных пылей и дымов.

Цель работы: теоретическое и экспериментальное исследование процесса осаждения мелкодисперсных аэрозолей с характерным размером частиц, порядка микрометров, под действием акустического поля с целью ускорения осаждения частиц. Наложение акустического поля приводит к ускорению коагуляции частиц, кроме того, давление звукового излучения, направленное вниз, ускоряет гравитационное осаждение аэрозоля. Введение мелкодисперсной дополнительной фазы повышает скорость осаждения за счет увеличения количества центров коагуляции.

Методы исследования: физико-математическое моделирование. Математическая модель основана на уравнении Смолуховского, описывающем динамику изменения функции распределения частиц аэрозолей по размерам с учетом ультразвукового воздействия, испарения (для жидко-капельных аэрозолей) и осаждения. В качестве вещества модельного аэрозоля использовалось подсолнечное масло; измерение дисперсности и концентрации частиц аэрозолей проводилось с помощью оптических методов.

Результаты: теоретическое и экспериментальное исследование дисперсных параметров и скорости осаждения показали эффективность использования акустического поля и дополнительной дисперсной фазы в целях осаждения аэрозоля.

Ключевые слова:

Коагуляция аэрозоля, ультразвуковое воздействие, двухфазный аэрозоль, испарение капель, функция распределения частиц по размерам.

Способность звуковых колебаний вызывать укрупнение мельчайших частиц, взвешенных в воздухе, была обнаружена еще на раннем этапе изучения особенностей мощного ультразвука [1, 2]. В промышленных установках очистки газов и осаждения дымов успешно используются акустические колебания в основном звуковых частот [2]. В работах [3–6] показано, что при осаждении наиболее сложных в этом смысле тонкодисперсных дымов необходимо использовать более высокие, ультразвуковые (УЗ) частоты. В данной работе подробно исследованы механизмы влияния УЗ-колебаний на осаждение аэрозолей с характерным размером частиц, порядка микрометра. Теоретически и экспериментально показано, что эффективность коагуляции и осаждения твердофазных и слабоиспаряемых аэрозолей при УЗ-воздействии повышает предварительное введение субмикронного жидко-капельного аэрозоля. Предложена математическая модель для описания кинетики коагуляции в зависимости от основных параметров УЗ-воздействия, свойств аэрозоля и среды: частоты и амплитуды звуковых колебаний, концентрации и дисперсного состава исходного аэрозоля, вязкости и температуры среды, физико-химических параметров матери-

ала частиц. Как вариант рассмотрена задача осаждения двухфазного аэрозоля с применением и без применения УЗ-воздействия.

Целью данной работы является теоретическое и экспериментальное исследование процесса осаждения вредных аэрозольных образований под УЗ-воздействием, в том числе с внесением дополнительной дисперсной фазы.

Полученные данные и предложенный метод осаждения могут быть применены для устранения мелкодисперсного аэрозоля пыли, задымленности, пара в закрытом пространстве, к примеру, в шахтах (угольная пыль и водяной туман), при тушении пожаров (дым и вода), при осаждении промышленных пылей с помощью водных аэрозолей и т. п.

Рассмотрим трансформацию распределения частиц в произвольном облаке по размерам с течением времени t . Следуя [5–7], запишем балансовое уравнение (интегральный вариант уравнения Смолуховского), описывающее изменение со временем вектора массовой функции распределения частиц по размерам. При этом сделаны следующие предположения:

- облако частиц пространственно однородно;
- существенными являются эффекты столкновения частиц; при этом учитываются только пар-

ные столкновения (параметр «упаковки», то есть отношения объема всех частиц к занимаемому им объему воздуха, много меньше единицы), каждое столкновение приводит к слиянию частиц. Существенным является испарение, в первую очередь за счет кривизны поверхности капли (в силу малости их размера), а также осаждение на стенках экспериментальной камеры.

Итак:

$$\frac{\partial g(D, t)}{\partial t} = I_1 + I_2 + I_3, \quad (1)$$

где I_1 описывает убыль частиц с диаметром D за единицу времени в единице объема за счет столкновения капли диаметра D с любой каплей диаметра D_1 :

$$I_1 = -g(D, t) \int_0^{D_{кр}(t)} K(D, D_1) g(D_1, t) dD_1,$$

где $K(D, D_1)$ – вероятность столкновений частиц,

$D_{кр} = \sqrt{\frac{18\eta H}{G\rho_p t}}$, H – верхняя граница облака; G – ускорение свободного падения, η – динамическая вязкость среды, ρ_p – плотность частицы. Все частицы, масса которых превышает критическое значение $D_{кр}(t)$, выпадают из облака и не принимают дальнейшего участия в коагуляции; спектр масс частиц на каждый момент времени t будет обрезан справа за счет седиментации крупных частиц, причем, постепенно эта граница будет смещаться в сторону все более мелких частиц.

Член I_2 описывает возникновение частиц диаметра D за счет столкновения капель с диаметрами D_1 и $D-D_1$:

$$I_2 = \frac{1}{2} \int_0^D K(D-D_1, D_1) g(D_1, t) g(D-D_1, t) dD_1.$$

Член I_3 описывает уменьшение массы частиц за счет их испарения:

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

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

Учитывая формулу Кельвина:

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

где σ – поверхностное натяжение, выражая массу частицы через ее диаметр, получим:

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

Начальные условия для уравнения (1): при $t=t_0 g(D, t_0)=g_0(D)$ – начальное распределение частиц по размерам. Для описания функции распределения частиц по размерам обычно применяют гамма-распределение. Счетная функция $f_0(D)=aD^\alpha \exp(-bD)$, где b, α – параметры распределения, a – нормировочный коэффициент, связана с массовой функцией следующим соотношением: $g(D)=m/m_{10}f(D)$, где m_{10} – среднеарифметическая масса частиц:

$$m_{10} = \int_0^\infty mf(D)dD.$$

Одна из статистических характеристик функции распределения частиц по размерам – это объемно-поверхностный диаметр $D_{32}=(\alpha+3)/b$.

Важным вопросом является определение вероятности столкновений частиц: чем она выше, тем быстрее произойдет коагуляция и осаждение аэрозоля. При отсутствии какого-либо воздействия эта величина обуславливается броуновским движением. В модели (1) вероятность столкновений частиц аэрозоля без дополнительного воздействия считалась пропорциональной сумме квадратов диаметров частиц:

$$K(D, D_1) = \frac{k_b n_0}{\nu} (D^2 + D_1^2), \quad (2)$$

где k_b – коэффициент пропорциональности; ν – кинематический коэффициент вязкости среды. В условиях УЗ-воздействия повышается вероятность столкновений частиц. Именно с помощью выражения (2) мы учтем параметры, характеризующие УЗ-воздействие, прежде всего, амплитуду и частоту излучения.

В [5, 6] получено, что число встреч частиц в звуковом поле пропорционально диаметру частиц, квадрату скорости их движения U_0 (которая, в свою очередь, определяется амплитудой звуковых колебаний), концентрации частиц, коэффициенту обтекания $k_{обр}$ и обратно пропорционально вязкости среды:

$$N \approx \frac{U_0^2 n_0 k_{обр}^2 (D^2 + D_1^2)}{\nu}. \quad (3)$$

Взвешенная в газе частица под действием сил звукового поля вовлекается в колебательное движение. В зависимости от свойств среды, размеров и плотности частицы она может увлекаться средой лучше или хуже, что определяется коэффициентом увлечения $k_{увл}$ – отношение амплитуды скорости взвешенной частицы к амплитуде скорости частицы газа. Считая, что между частицей и средой действует сила Стокса, получим формулу для коэффициента увлечения в виде [2]:

$$k_{увл} = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}, \quad (4)$$

где ω – частота акустического воздействия; $\tau = \rho_p D^2 / 18\eta$ – время релаксации частицы, η – динамический коэффициент вязкости среды.

Учитывая выражение для коэффициента увлечения частицы в звуковом поле (4), считаем, что

частица увлекается звуковым полем, повышая вероятность столкновений с фиксированной частицей в $k_a^2 = k_a(1-k_{\text{ввл}})^2$ раз, где k_a – коэффициент пропорциональности. Тогда вероятность столкновений частиц с диаметрами D и D_1 пропорциональна $N(1-k_{\text{ввл}})^2$, или с учетом (2)–(4):

$$K(D, D_1) = \frac{k_b n_0}{\nu} (D^2 + D_1^2) \left(1 + k_a U_0^2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \right)^2 \right). \quad (5)$$

Из (5) следует, что чем меньше диаметр частиц (и τ), тем требуется большая частота ω для повышения скорости коагуляции. Из этого выражения также видно, что повышение концентрации частиц n_0 способствует ускорению коагуляции и осаждения. Мы предлагаем повысить концентрацию частиц путем введения в существующий аэрозоль дополнительной фазы. В этом случае следует ожидать, что при использовании одной и той же массы вводимого аэрозоля больший эффект будет получен при большей дисперсности последнего: больше количество частиц n_0 , выше удельная поверхность, выше число столкновений в единицу времени и выше скорость коагуляции, осаждения.

Описанную выше модель коагуляции аэрозоля (1) для учета второй фазы дополним начальным условием вида:

$$f(D) = a((1-\delta)D^\alpha \exp(-bD) + \delta D^{\alpha_1} \exp(-b_1 D)),$$

где параметры распределения с индексом 1 относятся к дополнительной фазе аэрозоля; δ – расчетная доля частиц дополнительной фазы. Вероятность столкновений повышается при введении дополнительной фазы на $(1+\delta/(1-\delta))$:

$$K(D, D_1) = \frac{k_b n_0}{\nu} \left(1 + \frac{\delta}{1-\delta} \right) (D^2 + D_1^2).$$

Модель (1) описывает, прежде всего, изменение спектра масс частиц аэрозоля при воздействии на него УЗ-поля, испарении частиц, гравитационном осаждении и введении дополнительной фазы. В практическом смысле важным является вопрос уменьшения массы аэрозоля со временем.

Выражение изменения массы за счет седиментации можно получить из закона Стокса движения частиц в воздухе:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{G \rho_p D^2}{18 \eta},$$

где dh – расстояние, которое проходит частица диаметра D за время dt . В каждый момент времени dt от общей массы аэрозоля, размещенного в объеме SH , исчезнет масса частиц, размещенных в слое $dm = dh(D)S$, где S – площадь дна экспериментальной камеры. Относительное уменьшение массы со-

ставит: $\frac{dm}{m_{\text{all}}} = \frac{dh(D)}{H}$, где m_{all} – масса аэрозоля на текущий момент времени. Таким образом,

$$\frac{dm}{dt} = \frac{dh}{dt} \frac{m_{\text{all}}}{H} = \frac{G \rho_p D^2 m_{\text{all}}}{18 \eta H}. \quad (6)$$

Необходимо также учесть убыль массы за счет испарения и за счет тех частиц, которые полностью выпали в осадок (частицы с диаметром, более D_{cr}). Таким образом, общее изменение массы, после суммирования по всем фракциям распределения, составит:

$$\frac{dm}{dt} = \int_0^{D_{\text{кр}}} \left(\frac{2\pi D_f M D \rho_{pl}}{RT \rho_p} \left(e^{\frac{4\sigma M}{\rho_p RT D}} - 1 \right) + \frac{G \rho_p D^2 m_{\text{all}}}{18 \eta H} \right) g(D) dD + \int_{D_{\text{кр}}}^{\infty} m_{\text{all}}(t) g(D) dD.$$

Второй механизм повышения скорости осаждения заключается в том, что УЗ-воздействие создает избыточное давление (при размещении источника ультразвука над облаком аэрозоля) [8]. Это давление приводит к уменьшению высоты облака H во время действия излучения, а значит, в соответствии с выражением (6), к ускорению осаждения аэрозоля (независимо от его коагуляции). Давление звукового излучения выражается формулой [9]: $P = 2E_{k1}(1-R^2) - 2E_{k2}$, где E_{k1} и E_{k2} – средние по времени значения плотности кинетической энергии падающей волны в воздухе и прошедшей волны в облаке, R – коэффициент отражения звуковой волны от поверхности раздела фаз. При уровне интенсивности 140 Дб, применяемом в установках для коагуляции аэрозолей, $P \sim 10$ Па. Скорость движения верхней границы облака, вызванного избыточным радиационным давлением, определяется выражением:

$$\frac{dH}{dt} = \sqrt{\frac{2P}{\rho_p}}.$$

Для создания жидкокапельного аэрозоля использовался краскопульт КРАТОН R 200 LVLP-02S, настроенный на заданные нами характеристики (средний размер частиц около 9 мкм). В ходе проведения экспериментов камера заполнялась аэрозолем в течение 1 минуты (масса распыленной жидкости составила 9 г). Дополнительная фаза (водный аэрозоль с параметрами функции распределения $\alpha=2,1$, $b=0,9$) генерировалась с помощью УЗ-распылителя «Муссон-2» (распылитель 2). Для создания акустического поля, воздействующего на аэрозоль, использовался ультразвуковой дисковый излучатель УЗКС 320. Технические характеристики УЗ-аппарата: диаметр излучателя – 320 мм, уровень звукового давления – не менее 140 дБ, частота колебаний – 28 кГц. Дисперсные характеристики и концентрацию аэрозоля измеряли с помощью оптических методов, описанных в [10]. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.



Рис. 1. Схема экспериментальной установки

В качестве модельной среды рассмотрено подсолнечное масло. Подсолнечное масло содержит влагу и летучие вещества от 10 до 30 %. В расчетах доля быстроиспаряемых веществ в масле была принята равной 15 %.

На рис. 2, а приведена зависимость относительной массы аэрозоля подсолнечного масла m/m_0 (где m_0 – начальная масса частиц аэрозоля), рассчитанная по приведенной выше модели (кривые) и измеренные экспериментально (точки), в зависимости от времени при УЗ-воздействии (кривая 2) и без него (кривая 1). Перегиб кривой в области около 100 секунд обусловлен испарением воды и летучих веществ из капель масла. Дальнейшая эволюция аэрозоля обусловлена коагуляцией капель, радиационным давлением на облако и осаждением частиц. На рис. 2, б приведена зависимость объемно-поверхностного диаметра от времени для масляного аэрозоля в случае с УЗ и без УЗ-воздействия. Распределение частиц от времени деформируется

слабо, но несколько сильнее при наложении акустического поля, что связано с ускоренной коагуляцией частиц.

На рис. 3 показана зависимость относительной массы (а) и объемно-поверхностного диаметра (б) аэрозоля подсолнечного масла от времени при УЗ-воздействии с использованием дополнительной фазы (водного аэрозоля, кривая 2) и без нее (кривая 1). Введение в аэрозоль дополнительной фазы ускоряет осаждение аэрозоля, способствуя коагуляции.

Рис. 4 иллюстрирует эффект воздействия дополнительной фазы водного аэрозоля на осаждение подсолнечного масла без наложения акустического поля. Более глубокое снижение концентрации аэрозоля обусловлено испарением дополнительной фазы водных капель; затем снижение концентрации происходит практически с той же скоростью, что и у исходного масляного тумана.

В таблице приведено расчетное время осаждения масляного аэрозоля для четырех случаев: без

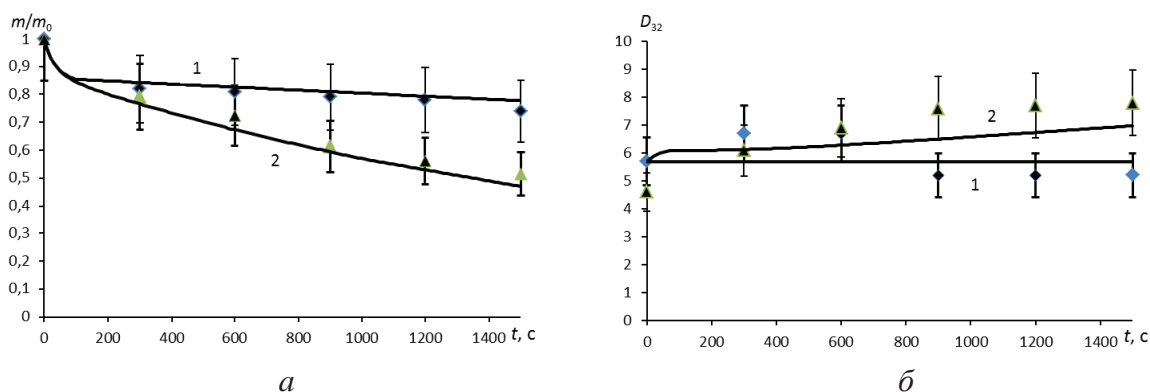


Рис. 2. Зависимость а) относительной массы; б) объемно-поверхностного диаметра аэрозоля подсолнечного масла от времени без УЗ-воздействия (1) и с УЗ-воздействием (2)

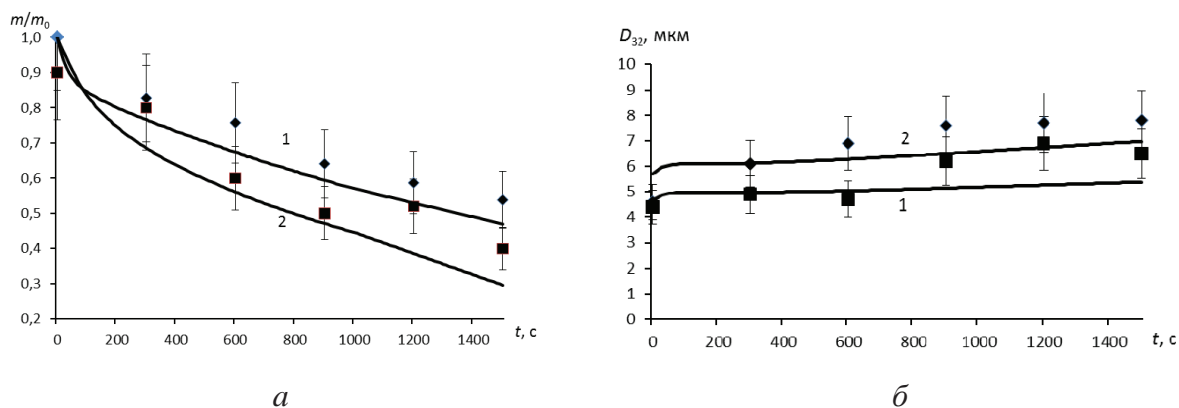


Рис. 3. Зависимость а) относительной массы; б) объемно-поверхностного диаметра аэрозоля подсолнечного масла от времени при УЗ-воздействии с дополнительной фазой водного аэрозоля (2) и без дополнительной фазы (1)

УЗ-воздействия и введения дополнительного водного аэрозоля; с УЗ-воздействием; под действием ультразвука и дополнительным водным аэрозолем; только с водным аэрозолем, без УЗ-воздействия.

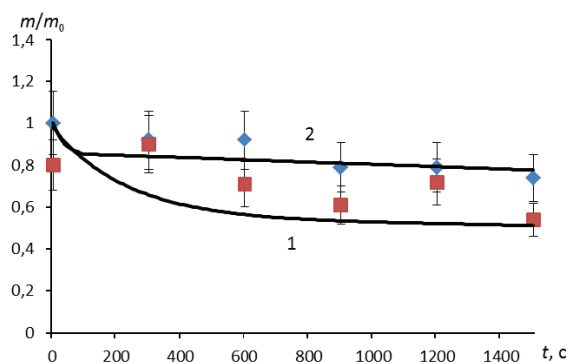


Рис. 4. Зависимость относительной массы частиц аэрозоля подсолнечного масла от времени без УЗ-воздействия: 1 – с введением 5 г водного аэрозоля дополнительно; 2 – без введения дополнительного аэрозоля

Таблица. Время полного осаждения масляного аэрозоля при разных видах воздействия

Вид воздействия	Время осаждения, ч
Без воздействия	4,41
УЗ-воздействие, 28 кГц, 140 Дб	1,07
Введение дополнительно водного аэрозоля ($D_{32} \sim 5$ мкм)	4,38
УЗ-воздействие + дополнительный водный аэрозоль	0,69

Как видно из проведенных расчетов, УЗ-воздействие и введение дополнительного мелкодисперсного водного аэрозоля позволяет существенно снизить время осаждения исходного (слабоиспаряемого) аэрозоля. Эксперименты подтверждают этот вывод. Предложенная физико-математическая модель, основанная на уравнении Смолуховского с учетом испарения, ускорения коагуляции и осаждения облака за счет УЗ-воздействия, в том числе облака двухфазного аэрозоля, удовлетворительно описывает экспериментальные данные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Patterson H.S., Sawood W. Phenomena in a Sounding Tube // Nature. – 1931. – V. 127. – № 3209. – 667 p.
2. Розенберг Л.Д. Физические основы ультразвуковой технологии. – М.: Наука, 1970. – 689 с.
3. Ультразвуковая коагуляция аэрозолей (монография) / В.Н. Хмелев, К.В. Шалунова, С.Н. Цыганок, Р.В. Барсуков, А.Н. Сливин, А.В. Шалунов. – Бийск: АлтГТУ, 2010. – 228 с.
4. Экспериментальное исследование процессов трансформации аэрозолей при ультразвуковом воздействии / А.А. Антонникова, Н.В. Коровина, О.Б. Кудряшова, И.Р. Ахмадеев // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25. – № 07. – С. 650–652.
5. Кудряшова О.Б., Антонникова А.А. Физико-математическая модель эволюции двухфазных аэрозолей при ультразвуковом воздействии // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2012. – № 4 (20). – С. 87–94.
6. Кудряшова О.Б., Антонникова А.А. Математическая модель эволюции аэрозолей при ультразвуковом воздействии // Из-

7. Волощук В.М. Кинетическая теория коагуляции. – Л.: Гидрометеониздат, 1984. – 284 с.
8. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. – М.: Наука, 1984. – 403 с.
9. Стретт Дж.В. (лорд Рэлей) Теория звука. 2 изд. – М.: Государственное изд-во технико-теоретической литературы, 1955. – Т. 2. – 503 с.
10. Remote optical diagnostics of nonstationary aerosol media in a wide range of particle sizes / O. Kudryashova, A. Pavlenko, B. Vorozhtsov, S. Titov, V. Arkhipov, S. Bondarchuk, E. Maksimenko, I. Akhmadeev, E. Muravlev // Photodetectors. – Rijeka, Croatia: InTech, 2012. – P. 341–364.

Поступила 29.07.2013 г.

ULTRASONIC SEDIMENTATION OF SUPERFINE AEROSOL

Aleksandra A. Antonnikova,

Institute for Problems of Chemical & Energetic Technologies of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Russia, Altai territory, 659322, Biysk, Socialisticheskaya street, 1. E-mail: antonnikova.a@mail.ru

Natalya V. Korovina,

Institute for Problems of Chemical & Energetic Technologies of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Russia, Altai territory, 659322, Biysk, Socialisticheskaya street, 1. E-mail: korovina.nata@mail.ru

Olga B. Kudryashova,

Cand. Sc., Institute for Problems of Chemical & Energetic Technologies of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Russia, Altai territory, 659322, Biysk, Socialisticheskaya street, 1. E-mail: olgakudr@inbox.ru

Relevance of the work is caused by the need of sedimentation of industrial and technogenic dusts and smokes.

The main aim of research is theoretical and experimental study of sedimentation of superfine aerosols with a typical particle size, about micrometers, under the influence of acoustic field for particle sedimentation acceleration. The acoustic field imposing results in particle coagulation acceleration, besides, the sound radiation downward pressure accelerates aerosol gravitational sedimentation. Introduction of a superfine additional phase increases sedimentation speed because of growth of coagulation center number.

The methods used in the study: physical and mathematical modeling. The mathematical model is based on Smolukhovsky equation, describing dynamics in changing distribution function of aerosol particles by size considering ultrasonic influence, evaporation (for liquidly-drop aerosols) and sedimentation. Sunflower oil was used as a substance of a model aerosol; dispersion and concentration of aerosol particles were measured by optical methods.

The results: theoretical and experimental study of disperse parameters and speed of sedimentation showed the efficiency of application of acoustic field and additional disperse phase for aerosol sedimentation.

Key words:

Aerosol coagulation, ultrasonic influence, two-phase aerosol, evaporation of droplets, particle size distribution function.

REFERENCES

- Patterson H.S., Cawood W. Phenomena in a Sounding Tube. *Nature*, 1931, vol. 127, no. 3209, 667 p.
- Rozenberg L.D. *Fizicheskie osnovy ultrazvukovoy tekhnologii* [Physical bases of ultrasonic technology]. Moscow, Nauka, 1970. 689 p.
- Khmelev V.N., Shalunova K.V., Tsyganok S.N., Barsukov R.V., Slivin A.N., Shalunov A.V. *Ultrazvukovaya koagulyatsiya aerorozolei (monografiya)* [Ultrasonic coagulation of aerosols (monograph)]. Biysk, AltSTU, 2010. 228 p.
- Antonnikova A.A., Korovina N.V., Kudryashova O.B., Akhmadeev I.R. Eksperimentalnoe issledovanie protsessov transformatsii aerorozolei pri ultrazvukovom vozdeystvii [Experimental study of aerosol transformation processes at ultrasonic exposure]. *Atmospheric and oceanic optics*, 2012, vol. 25, no. 07, pp. 650–652.
- Kudryashova O.B., Antonnikova A.A. Fiziko-matematicheskaya model evolyutsii dvukhfaznykh aerorozolei pri ultrazvukovom vozdeystvii [Physicomathematical model of evolution of two-phase aerosols at ultrasonic action]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvenno-go universiteta. Matematika i mekhanika*, 2012, no. 4 (20), pp. 87–94.
- Kudryashova O.B., Antonnikova A.A. Matematicheskaya model evolyutsii aerorozolei pri ultrazvukovom vozdeystvii [Mathematical model of aerosol evolution at ultrasonic influence]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 2, pp. 160–163.
- Voloshchuk V.M. *Kineticheskaya teoriya koagulyatsii* [Kinetic Theory of Coagulation]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1984. 284 p.
- Krasilnikov V.A., Krylov V.V. *Vvedenie v fizicheskuyu akustiku* [Introduction into physical acoustics]. Moscow, Science Publ., 1984. 403 p.
- Strett Dzh.V. (lord Reley) *Teoriya zvuka* [Theory of sound]. Moscow, State publishing house of technical and theoretical literature, 1955. Vol. 2, 503 p.
- Kudryashova O., Pavlenko A., Vorozhtsov B., Titov S., Arkhipov V., Bondarchuk S., Maksimenko E., Akhmadeev I., Muravlev E. Remote optical diagnostics of nonstationary aerosol media in a wide range of particle sizes. *Photodetectors*. Rijeka, Croatia, InTech, 2012, pp. 341–364.