

УДК 544.733.422:519.87

О.Б. Кудряшова, А.А. Антонникова

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ
ДВУХФАЗНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

Математическая модель основана на уравнении Смолуховского, описывающем динамику изменения функции распределения частиц аэрозолей по размерам с учетом ультразвукового воздействия, испарения (для жидкокапельных аэрозолей) и осаждения. Проведено исследование асимптотического поведения функции вероятности столкновений частиц аэрозоля от частоты ультразвука. Исследовано влияние введения дополнительной фазы – жидкокапельного аэрозоля в уже существующий твердофазный – на скорость коагуляции и осаждения. Представлены результаты экспериментального исследования дисперсных параметров аэрозоля.

Ключевые слова: коагуляция аэрозоля, ультразвуковое воздействие, двухфазный аэрозоль, испарение капель, функция распределения частиц по размерам.

Процессу ультразвуковой (УЗ) коагуляции аэрозолей посвящено много работ. Многие авторы рассматривают процессы взаимодействия частиц теоретически, но результаты эксперимента, тем не менее, описываются эмпирическими формулами.

В работах [1, 2] приводятся математические модели, использующие балансовый подход Смолуховского в сочетании с выкладками ортокинетической и гидродинамической гипотез взаимодействия частиц. При этом проведено сравнение с экспериментом по оптимальным частотам и амплитудам звукового воздействия. Однако полученные выражения не наглядны: не позволяют просмотреть асимптотические закономерности, и для прогнозирования процессов коагуляции аэрозолей приходится либо проводить численный эксперимент, либо пользоваться более наглядными, но не обоснованными физически интерполяционными формулами, описывающими физический эксперимент.

В работе предложены выражения для 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 материала частиц. Как вариант рассмотрена задача осаждения двухфазного аэрозоля с применением и без применения ультразвукового воздействия. Такая задача на практике имеет место, 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 [3–5], запишем балансовое уравнение (интегральный вариант уравнения Смолуховского), описывающее изменение со временем функции распределения частиц по размерам:

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

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 :

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

где $K(D, D_1)$ – вероятность столкновений частиц, $D_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{9\eta H}{2g\rho_{\text{ч}}t}}$, H – верхняя граница облака; g – ускорение свободного падения, η – динамическая вязкость среды, $\rho_{\text{ч}}$ – плотность частицы. Все частицы, масса которых превышает критическое значение $D_{\text{кр}}(t)$, выпадают из облака и не принимают дальнейшего участия в коагуляции; спектр частиц на каждый момент времени t будет обрезан справа за счет седиментации крупных частиц, причем постепенно эта граница будет смещаться в сторону все более малых частиц.

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

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

Учет испарения частиц за счет кривизны поверхности

Жидкие капли испаряются тем быстрее, чем меньше их размер, за счет кривизны поверхности. Член I_3 описывает уменьшение массы частиц за счет их испарения с учетом уравнения Кельвина для капиллярного эффекта:

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

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.

Член уравнения I_3 имеет смысл для жидкокапельных аэрозолей, состоящих из микронных и субмикронных капель, испарение для которых существенно из-за кривизны их поверхности, причем, при невысокой влажности окружающей среды ($p_{\text{drop}} \gg p_{\text{pl}}$).

Начальные условия для уравнения (1): при $t = t_0$ $f(D, t_0) = f_0(D)$ – начальное распределение частиц по размерам. Для описания функции распределения частиц по размерам обычно применяют гамма-распределение: $f_0(D) = aD^\alpha \exp(-bD)$, где b, α – параметры распределения; a – нормировочный коэффициент. В качестве характерного размера данного распределения можно выбрать модальный диаметр $D_0 = \alpha / b$.

Относительная концентрация аэрозоля уменьшается по сравнению с начальной n_0 за счет испарения и седиментации, и на момент времени t это уменьшение составит

$$\frac{\Delta n}{n_0} = \int_0^t \left(\int_0^{D_{\text{кр}}(t)/D_0} I_3 dx + \int_{D_{\text{кр}}(t)/D_0}^{\infty} f(D, t) dx \right) dt. \quad (2)$$

Вероятность столкновения частиц аэрозоля при ультразвуковом воздействии

Важным вопросом является определение вероятности столкновений частиц: чем она выше, тем быстрее произойдет коагуляция и осаждение аэрозоля. В отсутствие какого-либо воздействия эта величина обуславливается броуновским движением [3]. В работах [4, 5] вероятность столкновений частиц аэрозоля без дополнительного воздействия считалась пропорциональной сумме масс частиц:

$$K(D, D_1) = \frac{k_b n_0}{v} (D^3 + D_1^3), \quad (3)$$

где k_b – коэффициент пропорциональности; v – кинематический коэффициент вязкости среды.

В условиях ультразвукового воздействия повышается вероятность столкновений частиц. В выражение (3) должны войти параметры, характеризующие ультразвуковое воздействие, прежде всего, амплитуда и частота излучения.

Согласно [6], коагуляцию можно рассматривать как образование агрегатов в звуковом поле в результате взаимодействия частиц, вызванного акустическими течениями вокруг них в звуковом поле. Следуя этой работе, рассчитаем число встреч частиц в звуковом поле, полагая, что частицы встретятся в том случае, если линия тока потока, возникающего около одной из частиц и увлекающего вторую, пройдет в «трубке» диаметром, равным двум диаметрам частицы $2D$. Число встреч на единицу длины выделенной частицы за единицу времени равно $N = dS n_0 U_0$, где dS – площадка, ограниченная линиями тока; U_0 – скорость движения частиц. При невысоких уровнях звукового давления в [6] получено, что число встреч пропорционально диаметру частиц, квадрату скорости их движения (которая, в свою очередь, определяется амплитудой звуковых колебаний), концентрации частиц, коэффициенту обтекания $k_{обт}$ и обратно пропорционально вязкости среды:

$$N \approx \frac{U_0^2 n_0 k_{обт}^2 (D^3 + D_1^3)}{v}. \quad (4)$$

Взвешенная в газе частица под действием сил звукового поля вовлекается в колебательное движение («ортокинетическая» гипотеза). 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 [7]

$$k_{увл} = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}, \quad (5)$$

где ω – частота акустического воздействия; $\tau = \rho_c D^2 / 18\eta$ – время релаксации частицы, η – динамический коэффициент вязкости среды. Анализ этого выражения показывает, что амплитуда колебания частицы тем больше отличается от амплитуды колебания окружающей среды, чем больше размер и плотность частицы, чем выше частота звука и меньше вязкость.

Учитывая выражение для коэффициента увлечения частицы в звуковом поле (4), можно считать, что частица увлекается звуковым полем, повышая вероят-

ность столкновений с фиксированной частицей в $k_{\text{обт}}^2 = k_a(1 - k_{\text{увл}})^2$ раз, где k_a – коэффициент пропорциональности. Тогда вероятность столкновений частиц с диаметрами D и D_1 пропорциональна $N(1 - k_{\text{увл}})^2$ или с учетом (3) – (5):

$$K(D, D_1) = \frac{k_b n_0}{v} (D^3 + D_1^3) \left(1 + k_a U_0^2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \right)^2 \right). \quad (6)$$

Анализируя выражение (6), заметим, что:

- при отсутствии акустического поля ($k_a U_0^2 = 0$) вероятность столкновений сводится к броуновской (3);
- с повышением амплитуды воздействия (а значит, скорости U_0) вероятность повышается;
- акустическое воздействие с относительно низкими частотами ($\omega^2 \tau^2 \ll 1$) неэффективно ($k_{\text{увл}} \rightarrow 1, (1 - k_{\text{увл}}) \rightarrow 0$);
- существует оптимальная частота воздействия ($\omega^2 \tau^2 \gg 1$), наиболее эффективная с точки зрения коагуляции аэрозолей ($k_{\text{увл}} \rightarrow 0, (1 - k_{\text{увл}}) \rightarrow 1$).

Такое поведение функции (6) соответствует экспериментальным и теоретическим данным [1, 2, 8]. Пользуясь выражением (6), найдем предельно низкие (неэффективные) и оптимальные частоты ультразвукового воздействия:

$$\omega_{\min} = \frac{1}{\tau} \left[1 / \left(1 - \frac{o(\sqrt{k_b n_0 D_0^3})}{U_0 \sqrt{k_a}} \right)^2 - 1 \right], \quad (7)$$

$$\omega_{\max} = \frac{1}{\tau} \left[\frac{1}{o(1)} - 1 \right]. \quad (8)$$

Обозначим повышение вероятности столкновений частиц при ультразвуковом воздействии через K_1 :

$$K_1 = \left(1 + k_a U_0^2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \right)^2 \right).$$

Поведение повышающего коагуляцию коэффициента в зависимости от частоты иллюстрирует рис. 1 (водный аэрозоль, $k_a U_0^2 = 1$). Расчет для водяного аэрозоля минимальной и оптимальной частот воздействия по формулам (7) и (8) приведен на рис. 2.

Коагуляция двухфазного аэрозоля

Рассмотрим физико-математическую модель (1) в случае двухфазного аэрозоля. Введение в существующий аэрозоль дополнительной фазы повышает концентрацию частиц n_0 , что способствует ускорению коагуляции и осаждения, как видно из выражения (3). В этом случае следует ожидать, что при использовании одной и той же массы вводимого аэрозоля бóльший 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. Интересен вопрос воздействия ультразвука на такие двухфазные аэрозоли.

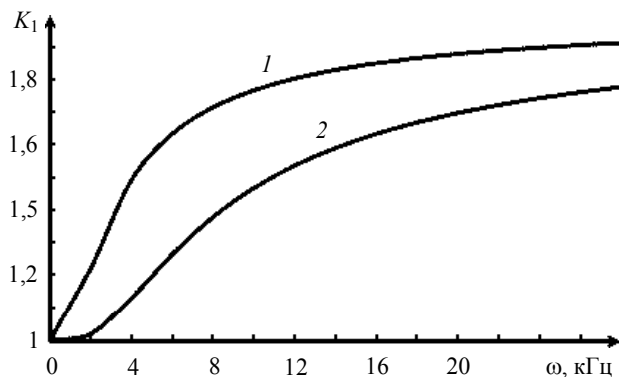


Рис. 1. Зависимость коэффициента K_1 от частоты УЗ-воздействия для водного аэрозоля: кр. 1 – $D = 5$ мкм; кр. 2 – $D = 1$ мкм

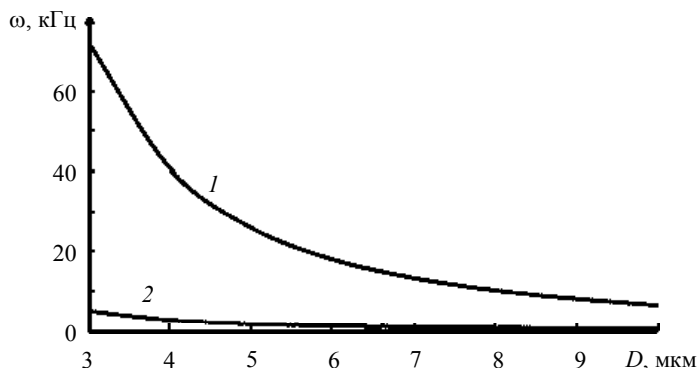


Рис. 2. Оптимальная (кр. 1) и минимальная частота (кр. 2) для водного аэрозоля

Описанную выше модель коагуляции аэрозоля дополним начальным условием вида

$$f(D) = a \left((1 - \delta) D^\alpha \exp(-bD) + \delta D^{\alpha_1} \exp(-b_1 D) \right), \quad (9)$$

где параметры распределения с индексом 1 относятся к дополнительной фазе аэрозоля; δ – счетная доля частиц дополнительной фазы. При этом необходимо учитывать возможность испарения частиц одной или обеих фаз.

Счетная доля δ связана с массовой долей w второй фазы аэрозоля следующим соотношением:

$$\delta = w / \left(w + (1 - w) \left[\frac{D_{32}}{(D_{32})_1} \right]^3 \frac{\rho_1}{\rho} \right).$$

Вероятность столкновений повышается при введении дополнительной фазы на $(1 + \delta/(1 - \delta))$:

$$K(D, D_1) = \frac{k_b n_0}{v} \left(1 + \frac{\delta}{1 - \delta} \right) (D^3 + D_1^3).$$

Проведем расчеты, чтобы определить как меняется спектр распределения частиц по размерам от времени в двухфазном аэрозоле и как происходит осаждение

частиц в случае введения дополнительной фазы, сопоставимой по размерам с основной («мелкий» аэрозоль) и более крупных размеров («крупный» аэрозоль). Возьмем следующие параметры начального распределения (9): основная фаза $\alpha = 0,1$, $b = 1$ ($D_{32} = 3,1$ мкм), дополнительная фаза $\alpha_1 = 0,1$, $b_1 = 0,5$ ($(D_{32})_1 = 6,2$ мкм, мелкий аэрозоль) и $\alpha_1 = 0,3$, $b_1 = 0,1$ ($(D_{32})_1 = 33$ мкм, крупный аэрозоль). Характерные размеры порядка 3 мкм соответствуют дымам; в качестве дополнительной фазы возьмем воду.

На рис. 3, *а* показано изменение массовой функции распределения частиц со временем при введении массовой доли $w=5\%$ «крупного» водного аэрозоля в дым; на рис. 3, *б* – для «мелкого» водного аэрозоля.

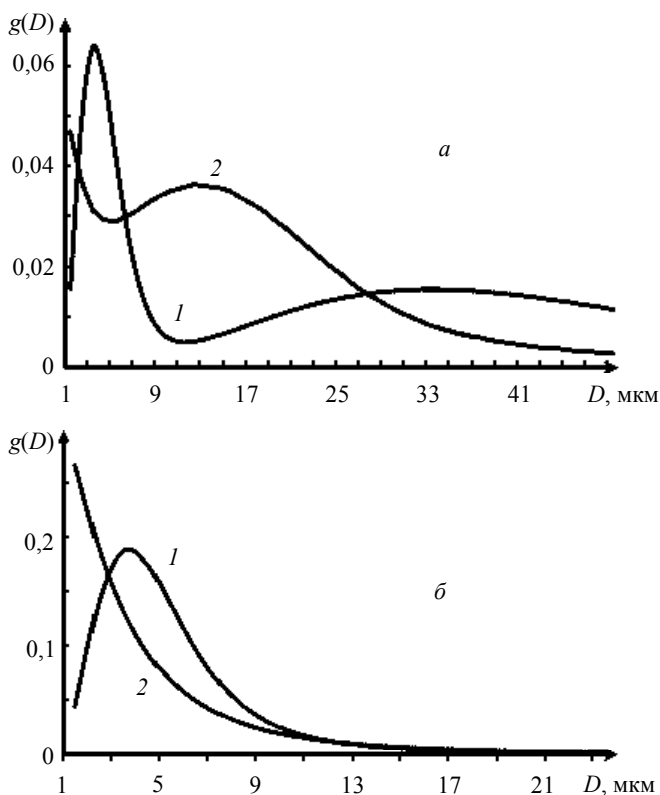


Рис. 3. Массовое распределение частиц по размерам при введении в основной аэрозоль с параметрами $\alpha = 0,1$, $b = 1$, $w = 5\%$ дополнительной фазы с параметрами: *а* – $\alpha_1 = 0,3$, $b_1 = 0,1$ («крупный»); *б* – $\alpha_1 = 0,1$, $b_1 = 0,5$ («мелкий»); кр. 1 – начальный момент времени, кр. 2 – через 100 секунд

Массовая функция распределения по размерам $g(D)$ связана со счетной соотношением: $g(D) = m/m_{10}f(D)$, где m_{10} – среднеарифметическая масса частиц:

$$m_{10} = \int_0^{\infty} m f(D) dD, \quad m - \text{масса частицы диаметра } D. \text{ Из-за испарения капель воды}$$

пик распределения смещается в сторону более мелких частиц. Суммарное осаж-

дение аэрозоля к моменту времени 100 с составит около 4,5 % для «крупного» аэрозоля и 23 % для «мелкого»; осаждение «чистого» дыма к этому моменту времени в соответствии с расчетом составит около 0,8 %.

Экспериментальная установка

Для проведения исследований была использована специальная экспериментальная установка, основу которой составляет аэрозольная камера объемом 1 м^3 , представляющая собой деревянный каркас. В верхней части камеры имеется отверстие для присоединения ультразвукового излучателя.

Для создания акустического поля, воздействующего на аэрозоль, использовался ультразвуковой дисковый излучатель УЗКС 320. Особенностью его конструкции является использование двухстороннего излучения диска: тыльной и фронтальной сторон. Технические характеристики ультразвукового аппарата: диаметр излучателя – 320 мм, уровень звукового давления – не менее 144 дБ, частота колебаний – 32 кГц. Для создания аэрозоля с жидкой дисперсной фазой использовались два ультразвуковых ингалятора серии «Муссон-2» (производительность ингалятора 1,2 мл/мин, средний размер частиц не более 3–5 мкм); для создания аэрозоля с твердой дисперсной фазой (уголь) использовался эжекционный метод; в качестве мелкодисперсного твердофазного аэрозоля также использовался дым от ароматических палочек. Распыляемое вещество для создания жидкокапельного аэрозоля – дистиллированная вода.

Измерения дисперсных характеристик и концентрации частиц аэрозолей в динамике проводилось с помощью специального измерительного комплекса, основанного на применении оптических методов измерений (метода спектральной прозрачности и малоуглового рассеяния) [9, 10].

Осаждение водного аэрозоля и дыма при ультразвуковом воздействии

На рис. 4 приведена зависимость среднего объемно-поверхностного диаметра частиц D_{32} (а) и относительной концентрации частиц (б) водяного аэрозоля от времени без ультразвукового воздействия (кр. 1) и с УЗ-воздействием (кр. 2).

В результате УЗ-воздействия в течение 1–2 мин происходит увеличение диаметра частиц, как следствие, происходит почти двукратное увеличение скорости осаждения. Полное осаждение аэрозоля при наличии УЗ-воздействия (рис. 4, б) происходит за 160 с (кр. 2), в контрольном опыте без воздействия – за 320 с (кр. 1).

На рис. 5 приведены зависимости D_{32} (а) и относительной концентрации частиц (б) для дыма от времени без ультразвукового воздействия (кр. 1) и с УЗ-воздействием (кр. 2). Колебания на графиках указанных величин обусловлены большой неоднородностью дыма, который распространяется по экспериментальному объему в виде слоистых структур. Ультразвуковое воздействие повышает эффективность осаждения субмикронного аэрозоля, но очень незначительно (рис. 5, б), что согласуется с теоретическими и экспериментальными результатами [1, 2, 4, 5, 8].

Для дымов со средним диаметром частиц около 2–4 мкм влияние ультразвука гораздо менее заметно, чем для более крупнодисперсных аэрозолей. Это соответствует теоретическим выкладкам, приведенным выше: оптимальная частота воздействия для таких дымов, рассчитанная по формуле (8), составляет свыше 70 кГц. Следовательно, для осаждения дымов необходимо применять другие способы (возможно, в сочетании с ультразвуковым воздействием).

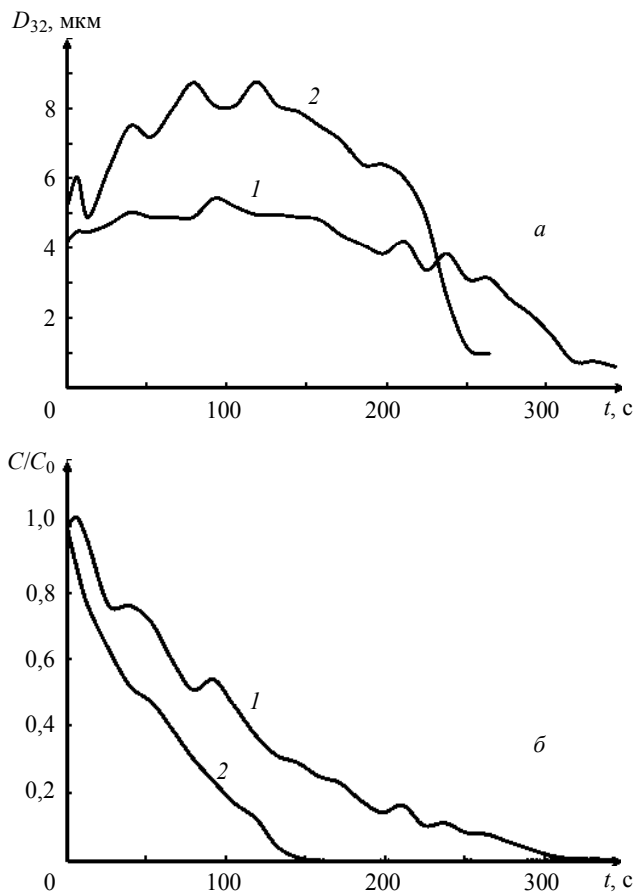


Рис. 4. Графики зависимости среднего объемно-поверхностного диаметра частиц D_{32} (а) и относительной концентрации частиц (б) водяного аэрозоля от времени без УЗ-воздействия (кр. 1) и с УЗ-воздействием (кр. 2)

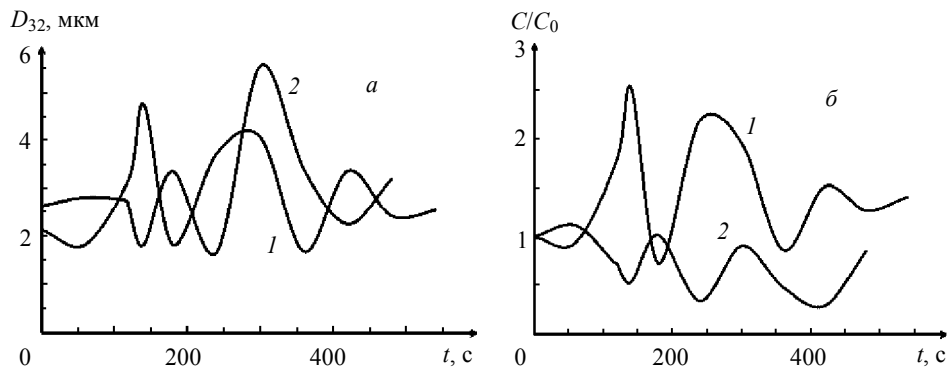


Рис. 5. График зависимости среднего объемно-поверхностного диаметра частиц D_{32} (а) и относительной концентрации частиц (б) дыма от времени без ультразвукового воздействия (кр. 1) и с УЗ-воздействием (кр. 2)

Таким способом может быть введение дополнительной фазы аэрозоля: мелко-дисперсного жидкокапельного аэрозоля в твердофазный (дым). Как было теоретически показано выше, это должно привести к повышению скорости коагуляции и осаждения дыма. Для подтверждения этого факта, а также выбора оптимальной дисперсности дополнительной фазы были проведены эксперименты, описанные ниже.

Осаждение дыма и угольной пыли при введении дополнительной фазы

В первой серии экспериментов создавался дым, масса дыма составляла около 20 г; в экспериментальной камере дополнительно распылялся 1 г воды, в одном случае – с помощью ультразвуковых ингаляторов «Муссон-2» с характерным размером капель 3–5 мкм, с другом случае – с помощью пульверизатора (характерный размер капель – 30–40 мкм).

На рис. 6 показана зависимость от времени относительной концентрации дыма в чистом виде и с добавлением дополнительной фазы (водного аэрозоля) разной дисперсности. Видно, что крупнодисперсные водяные капли не оказывают практически никакого влияния на скорость осаждения дыма; мелкодисперсные капли, напротив, сильно ускоряют осаждение. Эффект еще усиливается при УЗ-воздействии.

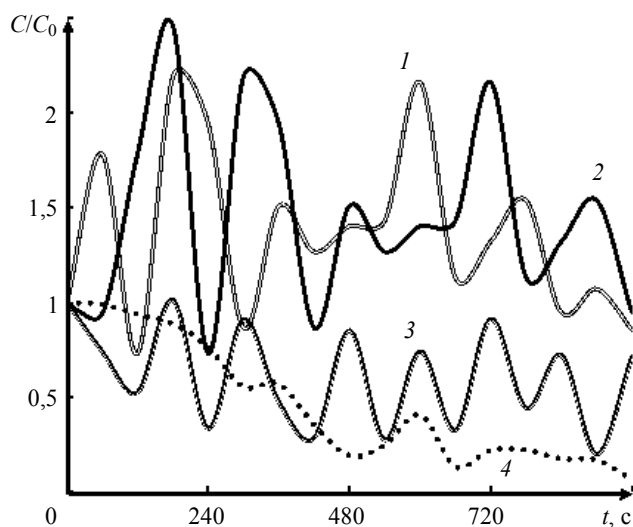


Рис. 6. Зависимость относительной концентрации дыма от времени при добавлении водного аэрозоля различной дисперсности и УЗ-воздействии: кр. 1 – дым; кр. 2 – дым и крупнодисперсный (30–40 мкм) водный аэрозоль; кр. 3 – дым и мелкодисперсный (2–4 мкм) водный аэрозоль; кр. 4 – дым, мелкодисперсный водный аэрозоль и ультразвуковое воздействие

Это объясняется тем, что при введении дополнительной фазы с мелким размером капель существенно увеличивается счетная концентрация частиц, чего не происходит при введении дополнительной фазы с крупным размером капель той же массы. В соответствии с (3) вероятность столкновения частиц $K(D, D_1)$ про-

порциональна их счетной концентрации, а значит, скорость коагуляции и осаждения аэрозоля повышается при увеличении числа частиц в единице объема. Увеличить число частиц просто, распылив мелкодисперсный водный аэрозоль.

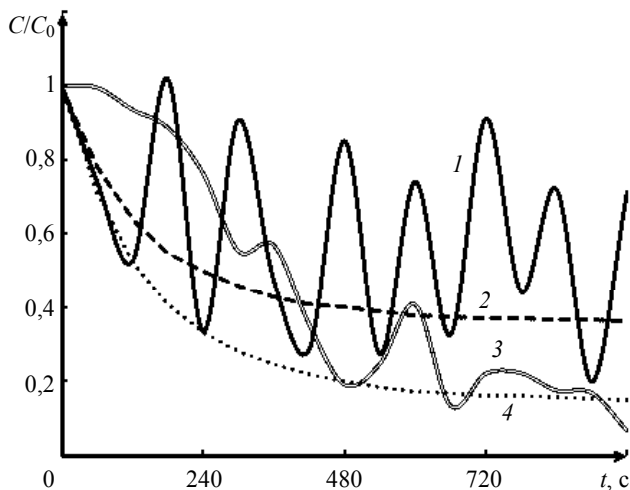


Рис. 7. Расчетная и экспериментальная зависимости относительной концентрации дыма от времени при добавлении мелкодисперсного (2–4 мкм) водного аэрозоля и УЗ-воздействии: кр. 1, 3 — эксперимент; кр. 2, 4 — расчет; кр. 3, 4 — УЗ-воздействие

Приведем экспериментальные результаты вместе с рассчитанными по модели, приведенной выше, на рис. 7. Рис. 7 показывает, как увеличивается скорость осаждения дыма при введении даже 5 % массы мелкодисперсного водного аэрозоля. Крупнодисперсный водный аэрозоль как в теории, так и в экспериментах, практически не оказывает влияния на скорость осаждения дыма, а УЗ-воздействие оказывается эффективным лишь при введении дополнительной мелкодисперсной фазы.

Как показывают проведенные эксперименты, ультразвуковое воздействие оказывает незначительное влияние на осаждение дыма, но при введении дополнительно мелкодисперсного водного аэрозоля скорость осаждения существенно растет; в этом случае УЗ-воздействие еще ускоряет коагуляцию и осаждение. Данный результат важен в практическом смысле для использования в дымоочистных сооружениях на производстве и при пожарах.

Иная картина взаимодействия жидкой дисперсной фазы с твердой наблюдается в опытах с угольной пылью. На рис. 8 показана динамика характерного диаметра D_{32} монофазного и двухфазного аэрозоля. Как видно из рисунка, этот диаметр за время наблюдения практически не меняется. На рис. 9 приведена зависимость относительной концентрации угольной пыли от времени при добавлении мелкодисперсного и крупнодисперсного водного аэрозоля. Введение дополнительной фазы практически не изменяет картину осаждения угля, хотя в первый момент в случае крупнодисперсной воды наблюдается всплеск концентрации (рис. 9, кр. 2). Исходный объемно-поверхностный диаметр угольной пыли составлял около 6–7 мкм и не менялся за время наблюдения, что говорит об отсутствии коагуляции; но частицы такого диаметра и плотности оседают в поле силы тяже-

сти за 20–30 мин, что мы и наблюдаем. Для угольной пыли скорость осаждения можно повысить с помощью УЗ-воздействия с оптимальной частотой 20–30 кГц примерно в два раза, так же, как было показано в опытах с водой.

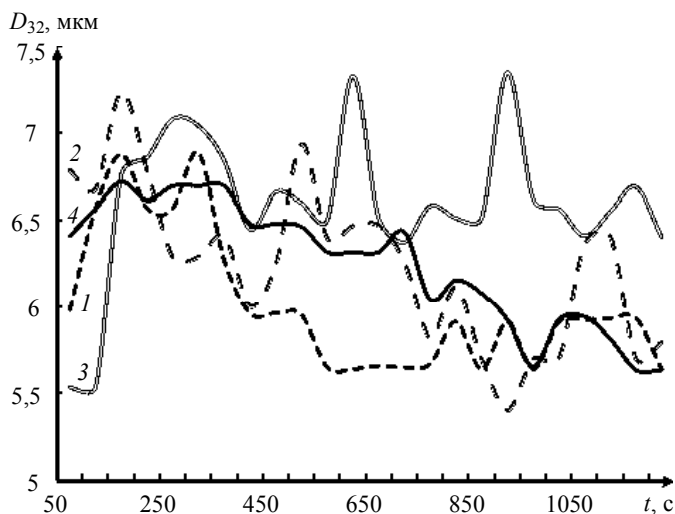


Рис. 8. Зависимость объемно-поверхностного диаметра угольной пыли от времени при добавлении водного аэрозоля различной дисперсности: кр. 1 – угольная пыль; кр. 2 – угольная пыль и УЗ; кр. 3 – угольная пыль и крупнодисперсный (30–40 мкм) водный аэрозоль; кр. 4 – угольная пыль и мелкодисперсный (2–4 мкм) водный аэрозоль

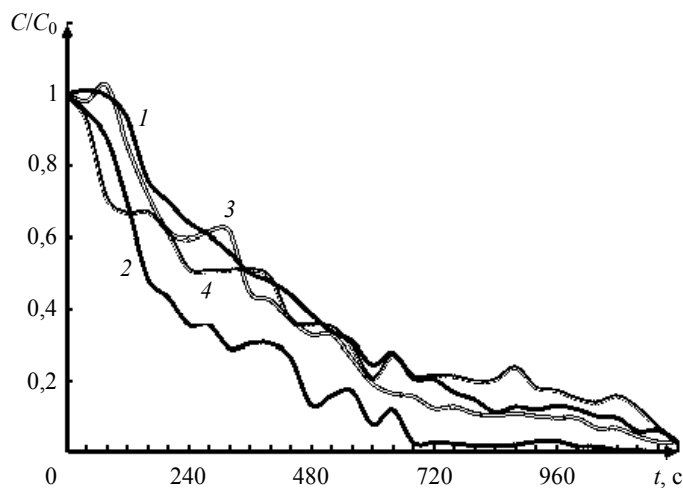


Рис. 9. Зависимость относительной концентрации дыма от времени при добавлении водного аэрозоля различной дисперсности: кр. 1 – угольная пыль; кр. 2 – угольная пыль и УЗ; кр. 3 – угольная пыль и крупнодисперсный (30–40 мкм) водный аэрозоль; кр. 4 – угольная пыль и мелкодисперсный (2–4 мкм) водный аэрозоль

Заключение

На основе модели коагуляции аэрозоля под действием ультразвука в виде варианта интегрального уравнения Смолуховского, со стоком (испарение) и обрезанием спектра (осаждение), получены зависимости эффективности осаждения от частоты ультразвука. Показано, что для каждого характерного размера частиц аэрозоля существует оптимальная и минимальная частоты акустического воздействия. Ультразвук с частотой ниже минимальной для аэрозоля с данным характерным размером частиц никак не влияет на скорость коагуляции и осаждения; повышение частоты ультразвука выше оптимальной не приводит к изменению эффективности осаждения. Предложен вариант модели коагуляции двухфазного аэрозоля с бимодальным распределением.

С применением оптических методов измерений экспериментально исследована динамика аэрозолей при ультразвуковом воздействии и введении дополнительной фазы различной дисперсности. Установлено, что введение мелкодисперсного водного аэрозоля позволяет существенно повысить эффективность осаждения дыма, в том числе с помощью ультразвука, но не оказывает влияния на осаждение более крупных и тяжелых частиц угольной пыли. Такое поведение данных аэрозолей предсказывают теоретические расчёты. Скорость осаждения водного аэрозоля увеличивается в два раза при УЗ-воздействии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хмелев В.Н., Шалунова К.В., Цыганок С.Н. и др. Ультразвуковая коагуляция аэрозолей. Бийск: АлтГТУ, 2010. 228 с.
2. Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Голых Р.Н., Шалунова К.В. Теоретическое исследование процесса акустической коагуляции газодисперсных систем // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП-2010): Материалы VII Всерос. научно-техн. конф. 6–7 октября 2010 года / Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. С. 222–227.
3. Волощук В.М. Кинетическая теория коагуляции. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 284 с.
4. 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.
5. Кудряшова О.Б. Математическая модель эволюции жидкокапельных аэрозолей // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 320. № 2. С. 129–133.
6. Розенберг Л.Д. Физические основы ультразвуковой технологии. М.: Наука, 1970. 689 с.
7. Денисов А.С., Подольский А.А., Турубаров В.И. Об увлечении аэрозольных частиц в звуковом поле при числах Рейнольдса ≤ 1 // Акустический журнал. 1965. Т. 11. Вып. 1. С. 146–155.
8. Антонникова А.А., Коровина Н.В., Кудряшова О.Б. и др. Экспериментальное исследование динамики дисперсных характеристик аэрозоля при ультразвуковом воздействии // Ползуновский вестник. 2011. № 4-1. С. 176–180.
9. Pavlenko A., Kudryashova O., Vorozhtsov B., et al. Modified method of optical diagnostics of aerosol media // Precision Instrument and Mechanology. 2012. V. 1. No. 1. ID12. URL: <http://www.pim-journal.org/paperInfo.aspx?ID=12>
10. 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.

Статья поступила 29.06.2012 г.

Kudryashova O.B., Antonnikova A.A. PHYSICOMATHEMATICAL MODEL OF THE EVOLUTION OF TWO-PHASIC AEROSOLS UPON AN ULTRASONIC ACTION. The proposed mathematical model is based on the Smoluchowski equation describing the dynamics of changes in the aerosol particle size distribution function with allowance for the ultrasonic influence, evaporation (for liquid-drop aerosols), and sedimentation. The asymptotic behavior of the probability function for collisions of aerosol particles on the ultrasound frequency is studied. The influence of introducing an additional phase—liquid-drop aerosol to the already existing solid-phase one—on the coagulation and sedimentation rates is investigated. The results of the experimental study of aerosol disperse parameters are presented.

Keywords: aerosol coagulation, ultrasonic influence, two-phasic aerosol, evaporation of droplets, particle size distribution function.

KUDRYSHOVA Olga Borisovna (Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences)

E-mail: olgakudr@inbox.ru

ANTONNIKOVA Alexandra Alexandrovna (Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences)

E-mail: Antonnikova.A@mail.ru