

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ АЭРОЗОЛЯ
С УЧЕТОМ ИСПАРЕНИЯ И КОАГУЛЯЦИИ КАПЕЛЬ**

О.Б. Кудряшова
А.В. Шалунов
Д.В. Генне
В.Н. Хмелев

olgakudr@inbox.ru
shalunov@bti.secna.ru
gdv@bti.secna.ru
vnh@bti.secna.ru

БТИ АлтГТУ, Бийск, Российская Федерация

Аннотация

Для решения задачи очистки и дезинфекции воздуха и поверхностей помещений с использованием аэрозолей необходимо понимать закономерности их эволюции. Наиболее перспективны мелкодисперсные аэрозоли с большой удельной поверхностью частиц. Предложена математическая модель распространения аэрозоля с каплями размером до 100 мкм в воздухе помещений. При этом учтены процессы испарения, диффузии, коагуляции капель, осаждения под действием силы тяжести и на стенках. Получены аналитические выражения для оценки массы капель, их размеров и концентрации в воздухе и на поверхностях в зависимости от времени. Проведено параметрическое исследование модели для оценки степени влияния условий распыления и физико-химических свойств жидкости. Введено выражение для коэффициента скорости осаждения частиц, зависящего от их размера нелинейно, определен критический диаметр, при котором осаждение минимально, а частицы дольше остаются в воздухе. Исследовано испарение частиц и его зависимость от влажности. Разработаны аналитические выражения для изменения массы аэрозоля во времени для импульсных и непрерывных источников. Экспериментально определены свободные параметры модели. Результаты работы могут быть полезны для развития методов аэрозольной очистки и дезинфекции, оптимизации таких методов относительно размеров частиц в заданных условиях распыления

Ключевые слова

Мелкодисперсный аэрозоль, эволюция аэрозоля, испарение, коагуляция, осаждение

Поступила 09.10.2024

Принята 15.01.2025

© Автор(ы), 2025

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ
(грант № 23-19-00875, <https://rscf.ru/project/23-19-00875/>)*

Введение. Проблемы экологии помещений актуальны в связи с применением токсичных примесей в строительстве [1], аварийными выбросами на производстве [2], бактериальными и вирусными инфекциями, распространяемыми воздушно-капельным путем [3]. Воздух в помещениях может загрязняться до 400 различных химических соединений, твердые частицы (особенно опасны РМ_{2.5}) и биологические загрязнители [4]. Не всегда возможно предотвращение выбросов, поэтому постоянно идет разработка и совершенствование методов активной борьбы с ними.

Один из способов дезинфекции в помещениях — распыление мелкодисперсного дезинфицирующего аэрозоля [5, 6]. Аэрозоли водных растворов поверхностно-активных веществ эффективны для осаждения дыма от пожаров [7]. Есть примеры успешного применения аэрозоля в металлургии (при производстве чугуна) для подавления выбросов бурого дыма [8]. Водный аэрозоль также используют для увлажнения воздуха в жилых и производственных помещениях, где это технологически необходимо [9].

Во всех практических приложениях важными характеристиками генераторов аэрозолей является дисперсность капель и их концентрация в воздухе. Эти две характеристики меняются со временем в результате распространения капель в пространстве, осаждения на поверхностях, взаимодействия и коагуляции.

Развиваются исследования, посвященные динамике атмосферных аэрозолей, в том числе математическому моделированию процессов их эволюции [10]. Важной задачей является удаление мелких загрязняющих частиц из газов с использованием различных физических воздействий (например, акустического [11–15]). Понимание воздушно-капельного механизма распространения инфекции COVID-19 вызвало множество исследований процессов распространения инфекционных аэрозолей в пространстве помещений, где в большинстве случаев применялись методы вычислительной гидродинамики (CFD) [3, 16]. Однако работ, посвященных математическому моделированию эволюции аэрозолей в помещениях, в научной литературе немного. Авторы настоящей работы стремятся восполнить этот пробел и исследовать эволюцию специально распыленных мелкодисперсных аэрозолей с размером частиц до 100 мкм. Такие аэрозоли могут быть сгенерированы, например, с применением ультразвуковых технологий или комбинированным способом [17].

Объект исследования — дезинфицирующие, увлажняющие, подавляющие дым, нейтрализующие аэрозоли, поэтому важно оценить массу и площадь поверхности капель в воздухе в зависимости от времени.

Цель работы — математическое моделирование эволюции специально распыленных мелкодисперсных аэрозолей в пространстве помещений с учетом процессов распространения, осаждения, испарения и коагуляции капель.

Материалы и методы решения задач, принятые допущения. Постановка задачи. Примем следующие допущения: скорость генерации аэрозоля u_{p0} (м/с) постоянна; массовая начальная функция распределения частиц по размерам $f(D_0)$ известна; мелкодисперсный аэрозоль: диаметр частиц 1...100 мкм (торможение в воздухе после распыления для таких частиц существенно); расстояние разлета частиц из сопла распылителя много меньше характерного размера пространства помещения (приближение точечного источника); распространение капель по объему помещений определяется процессом диффузии; столкновение капли с поверхностью приводит к прилипанию капли на поверхность.

Допущения имеют место для случая «спокойной» атмосферы помещения без мощных потоков воздуха. В противном случае частицы будут уноситься потоком. В этой постановке этот случай не рассматривается. Небольшие возмущения воздуха в пространстве, вызванные потоком частиц из распылителя, тепловыми движениями воздуха, приводят к тому, что диффузионное распространение малых частиц не является броуновским, а происходит с гораздо большей скоростью [18]. Эффективный коэффициент диффузии является свободным параметром задачи.

Пусть распылитель (источник частиц) находится в центре камеры кубической формы с ребром $2H$ (м), на равном расстоянии H от пола, стен и потолка. Результаты несложно распространить на более общий случай расположения источника.

Найдем массовую C_p (г/м³) и/или счетную C_n (м⁻³) концентрацию, функцию распределения по размерам $f(D, t)$ (мкм⁻¹) частиц, находящихся в воздухе, в зависимости от времени. Определим соответствующую массу осевшего на пол, потолок и стенки аэрозоля.

Результаты. Распространение капель в пространстве, осаждение на стенках. Капли диаметром 1...100 мкм тормозят в воздухе, преодолев небольшое расстояние. Выражения для расчетов расстояния и времени торможения малых частиц в воздухе приведены, например, в [14, 18]. Расчет для капель воды диаметром 100 мкм и менее с начальной скоростью 20 м/с дает следующие оценки: расстояние торможения не более 17 см, время торможения менее 1 мс.

Согласно экспериментам, даже мелкие частицы аэрозоля распространяются на большие расстояния в спокойной атмосфере помещения. Это означает, что распространение частиц в пространстве обусловлено не начальной скоростью вылета из сопла распылителя, а другими процессами. Для описания этого распространения используем диффузионную модель. Будем рассматривать не медленную броуновскую диффузию, возможную лишь в идеально неподвижной среде, а конвективную диффузию, вызванную различием плотности и температуры среды. Диффузионное распространение частиц — гораздо более медленный процесс, чем первоначальный разлет из сопла распылителя.

Опишем распространение аэрозоля уравнениями диффузии. Если частицы сосредоточены в начальный момент в точке, то можно оценить среднее расстояние \bar{r} (м), которое проходит частица за время t (с): $\bar{r}(t) = \sqrt{2k_D t}$, где k_D — эффективный коэффициент диффузии ($\text{м}^2/\text{с}$), который связан с вязкостью воздуха μ ($\text{Па} \cdot \text{с}$), размером частицы D_p (мкм) и температурой T (К) соотношением

$$k_D \sim \frac{T}{\mu D_p} = \frac{k_{D0}}{D_p}.$$

Коэффициент пропорциональности k_{D0} ($\text{м}^3/\text{с}$) является свободным параметром модели и может быть определен экспериментально.

Согласно [19], скорость осаждения частиц аэрозоля на стенке прямо пропорциональна массовой концентрации C_p :

$$\frac{dC_p}{dt} = -\beta C_p \quad (1)$$

с начальным условием $C_p(0) = C_{p0}$ ($\text{г}/\text{м}^3$).

Коэффициент пропорциональности β (с^{-1}) связан с площадью поверхности стенки S_w (м^2), коэффициентом k_D , объемом воздуха в помещении V_w (м^3), толщиной пограничного слоя δ (м) соотношением: $\beta \sim S_w k_D / (V \delta)$. Если рассматривать кубическую камеру, то это выражение примет вид $\beta = \beta_0 k_D / H$, где β_0 обратно пропорционален δ . Толщина пограничного слоя существенно зависит от интенсивности процессов конвекции: если конвекция более интенсивна, то пограничный слой становится тоньше. По данным [19], толщина δ в различных условиях может составить 0,5...20 мкм. Параметр β_0 (м^{-1}) также можно рассматривать как свободный параметр модели. Рассмотренная динамика концентрации частиц

в воздухе определяет массу осевших частиц m_p (г) по соотношению $m_p / m_{p0} = 1 - C_p / C_{p0}$, где m_{p0} — начальная масса частиц.

Выразим решение уравнения (1) для массы осевших частиц. Это решение имеет экспоненциальный вид:

$$\frac{m_p}{m_{p0}} = 1 - \exp(-\beta t). \quad (2)$$

Уравнение (2) определяет динамику осаждения частиц аэрозоля на всех шести стенках камеры, включая боковые стенки, дно и потолок. Следует отметить, что частицы разных размеров будут осаждаться с разной скоростью, так как скорость диффузии для каждого размера частиц будет различна. Крупные массивные частицы имеют меньшую скорость диффузии и, следовательно, меньшую скорость осаждения. Более крупные частицы с большей массой осаждаются под действием гравитации с большей скоростью, чем мелкие и легкие.

Гравитационное осаждение капель. Конвективные потоки, присутствующие около дна камеры и связанные с разностью температур воздуха и поверхности, также влияют на скорость гравитационного осаждения. Если учитывать конвективные потоки, то запишем выражение для концентрации частиц в воздухе [20, 21]:

$$\frac{dC_p}{dt} = -\frac{u_s}{H} C_p, \quad (3)$$

где u_s (м/с) — скорость стоксового осаждения капли,

$$u_s = \frac{(\rho_p - \rho) D_p^2}{18\mu} g,$$

ρ_p , ρ — плотность частицы и газа, кг/м³, $g = 9,81$ м/с² — ускорение свободного падения.

Выразим решение уравнения (3) для массы осевших частиц:

$$\frac{m_p}{m_{p0}} = 1 - \exp\left(-\frac{u_s t}{H}\right).$$

На скорость стоксового осаждения частиц влияет в первую очередь их размер. Поэтому частицы аэрозоля разных размеров осаждаются под действием гравитации с разной скоростью: более крупные и массивные осаждаются быстрее, чем легкие и мелкие. Например, скорость осаждения капли воды диаметром 1 мкм составит 0,3 см/с, а диаметром

100 мкм — 2,7 м/с. Таким образом, характерное время стоковой релаксации $t_b = H / (2u_s)$ для капли 1 мкм на высоте 1 м составит 2,8 мин, для капли 100 мкм — 0,19 с.

Цель — расчет концентрации частиц при осаждении на дне и стенках. Объединяя уравнения (1) и (3), получаем уравнения для концентрации частиц:

$$\frac{dC_p}{dt} = - \left(\frac{u_s}{H} + \beta \right) C_p. \quad (4)$$

Запишем решение уравнения (4) для массы осевших частиц:

$$\frac{m_p}{m_{p0}} = 1 - \exp \left(- \left(\frac{u_s}{H} + \beta \right) t \right). \quad (5)$$

Сделанные выкладки соответствуют случаю, когда время распыления аэрозоля много меньше времени его распространения в пространстве (импульсное распыление). В этом случае можно определить начальную массу аэрозоля, а его дальнейшая эволюция определится решением уравнения (5). Если аэрозоль распыляется постоянно, начиная с нулевого значения концентрации, то уравнение (4) примет вид

$$\frac{dC_p}{dt} = - \left(\frac{u_s}{H} + \beta \right) C_p + \frac{q}{H^3}, \quad (6)$$

где q — массовая скорость генерации частиц, кг/с. Начальное условие: $C_p(0) = 0$. Масса осевших частиц в зависимости от времени $m_p = q / H^3 - C_p$.

Анализ модели осаждения. В модели (6) присутствуют два конкурирующих слагаемых. Первое слагаемое описывает гравитационное осаждение, второе — осаждение на стенках. В свою очередь оба слагаемых зависят от диаметра частиц. Обозначим коэффициент скорости осаждения как $\gamma = u_s / H + \beta$ (с⁻¹). Для этого коэффициента верно уравнение

$$\gamma(D_p) = \frac{u_s}{H} + \beta = \frac{(\rho_p - \rho) D_p^2}{18\mu H} g + \frac{\beta_0 k_{D0}}{D_p H}. \quad (7)$$

Первый член уравнения, отвечающий за осаждение на стенках, становится меньше с увеличением размеров частиц. Второй член уравнения, отвечающий за осаждение под действием гравитации, возрастает. Таким образом, существует критический диаметр, соответствующий минимуму функции $\gamma(D_p)$, D_p ср.

Рассмотрим частицы диаметром 80 и 10 мкм, которые осаждаются с одинаковой скоростью, но частицы диаметром 80 мкм — на дне камеры, а частицы диаметром 10 мкм — на стенках. Критический диаметр соответствует наиболее медленному осаждению аэрозоля. Чтобы найти $D_{p\text{cr}}$, приравняем нулю производную $d\gamma/dD_p$. Получим

$$D_{p\text{cr}} = \sqrt[3]{\frac{9\mu\beta_0 k_{D0}}{(\rho_p - \rho)g}}. \quad (8)$$

Для воды $D_{p\text{cr}} \sim 25,5$ мкм (расчет для $\rho_p = 1000$ кг/м³, $\beta_0 = 0,01$ 1/м, $k_{D0} = 0,0001$ м/с).

Физический смысл существования такого диаметра частиц следующий. Такие частицы, по сравнению с другими, недостаточно массивные и крупные, чтобы быстро осесть под действием гравитации. Однако они недостаточно легкие и мелкие, чтобы в процессе диффузии быстро распространиться в пространстве и достичь стенок. Таким образом, создание аэрозоля с характерным размером частиц, равным $D_{p\text{cr}}$, позволит присутствовать частицам в воздухе помещения максимально долго.

В рассматриваемом случае отметим, что выражение (8) не зависит от геометрического размера H . При расширении постановки задачи на случай другой геометрии помещения размер H должен войти в (8). В такой постановке задачи критический диаметр зависит только от параметров, определяющих конвекцию и диффузию, плотности частиц и вязкости воздуха.

Осаждение полидисперсного аэрозоля. Уравнение (5) можно записать для полидисперсного аэрозоля, характеризующегося функцией распределения частиц по размерам $f(D_p)$:

$$\frac{m_p}{m_{p0}} = \int_0^{\infty} f(D_p) (1 - \exp(-\gamma(D_p)t)) dD_p, \quad (9)$$

где $\gamma(D_p)$ — функция, определяемая выражением (7).

Пусть функция частиц по размерам имеет вид $f(D) = aD^\alpha \exp(-bD)$, $a = b^{\alpha+1} / \Gamma(\alpha+1)$, где b, α — параметры распределения ($a > 0, \alpha > -1$); a — нормирующий множитель. Согласно результатам расчетов, снижение массы аэрозоля за счет осаждения для полидисперсной и монодисперсной моделей с диаметром, равным среднему объемному диаметру, практически совпадает. Это означает, что для расчета динамики осаждения нет необходимости применять полидисперсную модель, достаточно знать характерный размер ансамбля частиц.

Убыль суммарной массы капель за счет испарения. Кроме осадения, массовую концентрацию частиц в пространстве уменьшает испарение капель. Рассматриваем мелкодисперсные аэрозоли, для которых существенен фактор кривизны поверхности. Теплообмен таких частиц со средой происходит тем интенсивнее, чем больше кривизна (меньше радиус), вследствие большой удельной поверхности капель. Для скорости испарения капли используют уравнение Максвелла

$$\frac{dm_{drop}}{dt} = \frac{2\pi D_f M (p_{drop} - p_{pl})}{RT}, \quad (10)$$

где m_{drop} (г) — масса капли; D_f (м²/с) — коэффициент молекулярной диффузии; M (кг/моль) — молекулярный вес жидкости; p_{drop} (Па), p_{pl} (Па) — давление насыщенных паров над каплей и плоской поверхностью; R — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура.

Давление насыщенного пара над кривой поверхностью отличается от давления насыщенного пара над плоской поверхностью. Этот закон описывается уравнением Томсона (Кельвина) [22]:

$$\frac{p_{drop}}{p_{pl}} = \exp\left(\frac{4\sigma M}{\rho_p R T D_p}\right), \quad (11)$$

где σ — поверхностное натяжение (Н/м). Величина под экспонентой много меньше единицы. Это позволяет разложить (11) в ряд. Ограничиваясь линейными членами разложения, формулу (10) можно представить в виде:

$$\frac{dm_{drop}}{dt} = \frac{2\pi D_f M p_{pl}}{RT} \left(\frac{4\sigma M}{\rho_p R T D_p} - 1 \right) \quad (12)$$

с начальным условием $m_{drop}(0) = m_{drop0} = \pi \rho_p D_{p0}^3 / 6$, где $D_{p0} = D_p(0)$ — начальное значение диаметра капли. Интегрирование уравнения (12) даст зависимость изменения массы капли диаметра $D_p(t)$ от времени за счет испарения $m_{drop}(t)$. Выражение в скобках при относительно большом диаметре стремится к -1 , т. е. кривизна поверхности сначала не влияет на скорость испарения. По мере уменьшения диаметра выражение в скобке стремится к бесконечности и капля ускоренно испаряется. Отметим, что жидкости с большим значением поверхностного натяжения и/или молекулярной массой с маленькой плотностью будут обладать более выраженной зависимостью скорости испарения от кривизны поверхности, как следует из (12).

В уравнении (12) учтено влияние на скорость испарения кривизны поверхности, но не учтено наличие молекул воды в воздухе (влажность воздуха): уравнение (12) описывает испарение капли с учетом кривизны поверхности в абсолютно сухой воздух при $p_{pl} = p_s$, где p_s — давление насыщенных паров, Па. Если $p_{pl} \neq p_s$, то испарение является неравновесным, массовая скорость уноса молекул с поверхности капли в соответствии с формулой Кнудсена — Ленгмюра — Герца [23] зависит и от давления паров жидкости на расстоянии от поверхности p_∞ (порядка средней длины свободного пробега молекул), $dm_{drop}/dt \sim (p_s - p_\infty) = p_s(1 - v)$, где v — относительная влажность воздуха. Таким образом, с учетом влажности уравнение (12) примет вид

$$\frac{dm_{drop}}{dt} = \frac{2\pi D_f M p_s (1 - v)}{RT} \left(\frac{4\sigma M}{\rho_p R T D_p} - 1 \right). \quad (13)$$

Суммарная относительная масса капель монодисперсного аэрозоля на момент времени t :

$$\frac{m_l(t)}{m_{p0}} = \frac{D_p^3(t)}{D_{p0}^3}.$$

Учтем, что распределение частиц по размерам для полидисперсного аэрозоля задано функцией $f(D_p)$. Интегрируя по всем диаметрам капель, получаем новую суммарную массу капель

$$m_l(t) = \frac{\pi \rho_l}{6} \int_0^\infty D_p^3(t) f(D_p) dD_p.$$

Тогда с учетом испарения относительная масса капель к моменту времени t составит:

$$\frac{m_l(t)}{m_{p0}} = \frac{\int_0^\infty D_p^3(t) f(D_p) dD_p}{\int_0^\infty D_p^3(0) f(D_p) dD_p}.$$

Результаты расчета относительного диаметра частиц и относительной массы водного аэрозоля в соответствии с приведенной математической моделью показаны на рис. 1. В расчете использованы следующие данные: $\sigma = 0,073$ Н/м, $\rho_p = 1000$ кг/м³, $R = 8,31$ м²кг/(с² · К · моль), $T = 293$ К, $M = 0,018$ кг/моль, $D_f = 2,6 \cdot 10^{-5}$ м²/с, $p_s = 2340$ Па, $v = 0,5$. Кривая для поли-

дисперсного аэрозоля построена для параметров функции гамма-распределения частиц по размерам $\alpha = 5$, $b = 0,2 \text{ мкм}^{-1}$.

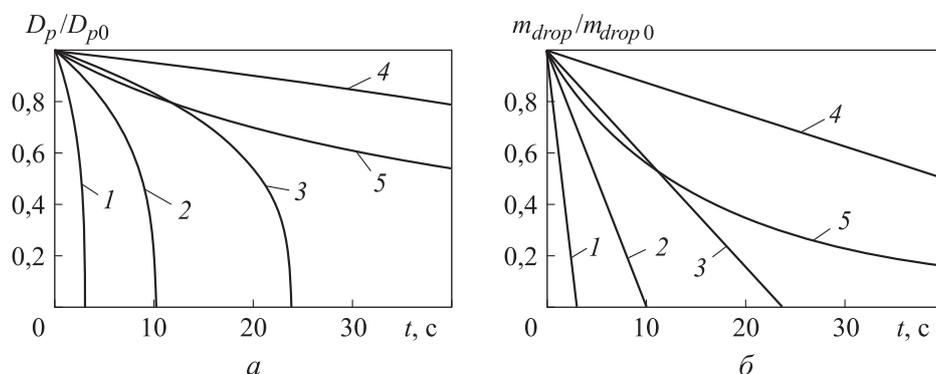


Рис. 1. Динамика уменьшения относительного диаметра частиц (а) и относительной массы аэрозоля (б) при испарении для $D_{p0} = 20$ (1), 30 (2), 40 (3) и 60 мкм (4) и полидисперсного аэрозоля (5)

Скорость испарения для относительно больших начальных размеров частиц сначала линейна в зависимости от времени, по мере уменьшения размеров капли кривизна поверхности растет и скорость увеличивается. Характерная кривая, иллюстрирующая эту закономерность, приведена на рис. 1, а для начального диаметра 30 мкм. Кривые уменьшения массы монодисперсного аэрозоля со временем (рис. 1, б) близки к линейным. При испарении полидисперсного аэрозоля сначала будет наблюдаться довольно быстрая убыль массы, затем испарение замедляется по мере истощения мельчайших частиц из распределения. С течением времени в воздухе останутся лишь относительно крупные медленно испаряющиеся капли.

Рассмотрим влияние влажности на испарение капель. Зависимости изменения относительного диаметра частиц и относительной массы полидисперсного аэрозоля от времени в результате испарения при различных значениях относительной влажности приведены на рис. 2.

Такие маленькие капли (диаметр 30 или 50 мкм) испаряются быстро в течение десятков или сотен секунд при относительной влажности до 90 %. При стремлении влажности к 100 % время испарения стремится к бесконечности (капли не испаряются). Высокая скорость испарения малых капель не позволяет им стать зародышами конденсации, поэтому значительно более медленные процессы конденсации в этой модели не рассмотрены.

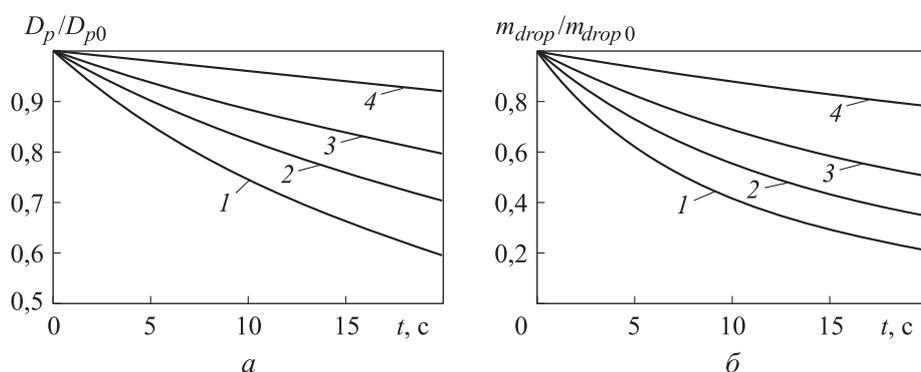


Рис. 2. Зависимости изменения относительного диаметра частиц (а) и относительной массы полидисперсного состава (б) от времени при $v = 20$ (1), 50 (2), 70 (3) и 90 % (4)

Убыль суммарной массы капель за счет испарения и осаждения при непрерывной генерации. Запишем уравнение изменения массы аэрозоля при непрерывной генерации с массовой скоростью q с учетом осаждения на стенках, дне и испарения:

$$\frac{dm_l}{dt} = q - m_l (\gamma(D_{30}) + \gamma_1(f(D_p))) = q - m_l \gamma_2, \quad (14)$$

где $\gamma_2 = \gamma + \gamma_1$ (c^{-1}),

$$\gamma_1 = \frac{12D_f Mp_s(1-v)}{RT} \int_0^\infty \left(\frac{4\sigma M}{\rho_p RT D_p(t)} - 1 \right) \frac{1}{\rho_p D_p^3(0)} f(D_p) dD_p \quad (15)$$

— коэффициент скорости испарения с учетом (13).

Начальное условие: $m_l(0) = 0$. Изменение диаметра частиц каждой фракции за счет испарения определяем по выражению (следует из (13)):

$$\frac{dD_p}{dt} = \frac{4D_f Mp_s(1-v)}{\rho_l RT D_p^2} \left(\frac{4\sigma M}{\rho_l RT D_p} - 1 \right). \quad (16)$$

Следует отметить, что коэффициент скорости осаждения γ зависит от диаметра (7). Как было показано выше, для описания осаждения полидисперсного аэрозоля можно использовать зависимость этого коэффициента от среднеобъемного диаметра D_{30} .

Интегро-дифференциальное уравнение (15) допускает численное решение. В результате можно получить значение коэффициента γ_1 , отвечающего за скорость испарения массы полидисперсного аэрозоля. Тогда для случая импульсной генерации (14) решается аналитически:

$$m_l(t) = m_l(0) \exp(-\gamma_2 t), \quad (17)$$

для случая непрерывной генерации:

$$m_l(t) = \frac{q}{\gamma_2} (1 - \exp(-\gamma_2 t)). \quad (18)$$

Соответственно, зависимость массовой концентрации частиц аэрозоля от времени: $C_p(t) = m_l(t) / H^3$. Зависимости массы аэрозоля от времени для импульсной и непрерывной генераций аэрозоля с учетом осаждения и испарения капель воды приведены на рис. 3.

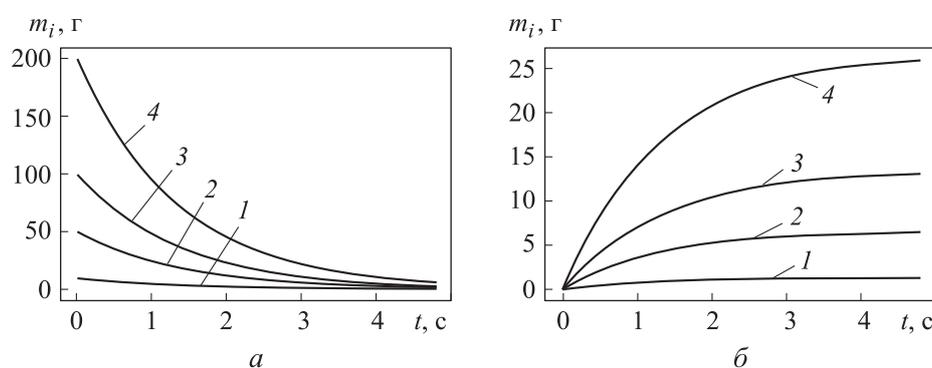


Рис. 3. Зависимости массы аэрозоля от времени:

а — для импульсной генерации аэрозоля с учетом осаждения и испарения капель воды для $m_{p0} = 10$ (1), 50 (2), 100 (3) и 200 г (4); *б* — для непрерывной генерации аэрозоля с учетом осаждения и испарения капель воды для $q = 1$ (1), 5 (2), 10 (3) и 20 г/с (4)

Согласно зависимостям (17) и (18), при стремлении времени t к бесконечности при импульсной генерации масса аэрозоля будет стремиться к нулю (частицы осядут на поверхностях и/или испарятся). При непрерывной генерации масса аэрозоля становится квазистационарной (поступление частиц из генератора равно испарению + осаждению), масса аэрозоля стремится к q / γ_2 .

Рассмотрены эволюция и распространение аэрозоля с учетом осаждения на дне, стенках камеры и испарения частиц. Если на аэрозоль действуют внешние поля, ускоряющие коагуляцию (ультразвуковые, электростатические), или условия интенсивного движения воздуха, то процессы коагуляции необходимо учитывать. В постановке задачи внешние поля отсутствуют. В этом случае коагуляцию необходимо учитывать для аэрозолей с высокой концентрацией частиц (счетная концентрация частиц аэрозоля $> 10^4 \text{ см}^{-3}$ [24]).

Процессы коагуляции приводят к увеличению размеров частиц, т. е. к изменению их дисперсности. Испарение также влияет на размеры капель (в сторону уменьшения). Рассмотрим вопрос изменения дисперсности частиц.

Изменение дисперсности частиц за счет коагуляции и испарения. В соответствии с подходом Смолуховского для описания изменения распределения частиц по размерам $f(D, t)$ во времени запишем интегро-дифференциальное уравнение [25, 26]:

$$\frac{\partial f(D, t)}{\partial t} = I_1 + I_2 + I_3, \quad (19)$$

где I_1 — параметр, описывающий уменьшение числа частиц диаметром D в единицу времени в результате столкновения с частицами диаметром D_1 :

$$I_1 = -f(D, t) \int_0^{\infty} K(D, D_1) f(D_1, t) dD_1.$$

Начальные условия для (19): при $t = 0$ $f(D, 0) = f_0(D)$ — начальное распределение частиц по размерам. Ядро уравнения $K(D, D_1)$ описывает вероятность столкновения частиц диаметрами D, D_1 в единицу времени (c^{-1}). Пусть вероятность столкновения частиц пропорциональна площади их сечения, коэффициенту диффузии и концентрации частиц: $K(D, D_1) = k_p(D^2 + D_1^2)$, $k_p = k_C k_D C_p$ ($m^{-2} \cdot c^{-1}$), где k_C — коэффициент пропорциональности.

Параметр I_2 описывает увеличение числа частиц диаметром D в результате столкновения частиц диаметрами $D - D_1$ и D_1 :

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

параметр I_3 — уменьшение суммарной массы капель в результате их испарения с учетом (16):

$$I_3 = \frac{\partial}{\partial D} \left(\frac{dD_{drop}}{dt} f(D) \right) = \frac{\partial}{\partial D} \left[\frac{4D_f M p_s (1 - v)}{\rho_l R T D^2} \left(\frac{4\sigma M}{\rho_l R T D} - 1 \right) f(D) \right].$$

В случае ультразвукового воздействия коэффициент k_p в ядре уравнения Смолуховского будет учитывать параметры этого воздействия: частоту ω и амплитуду U [13, 14]:

$$k_p = k_{p0} \left(1 + k_{amp} U^2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \right)^2 \right),$$

где $k_{p0} = k_C k_D C_p$ — коэффициент ядра без ультразвукового воздействия; k_{amp} — коэффициент пропорциональности; $\tau = \rho_p D^2 / (18\mu)$ — время стоксовой релаксации частиц. Введем безразмерный коэффициент, ответственный за частоту воздействия:

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

Безразмерный комплекс $k_a = k_{amp} U^2$ отвечает за амплитуду ультразвука. Тогда $k_p = k_{p0} (1 + k_a k_f)$. Коэффициент ядра Смолуховского увеличивается пропорционально безразмерным комплексам, отвечающим за амплитуду и частоту воздействия. Чем выше коэффициент, тем быстрее коагуляция частиц. Коэффициент k_a растет с амплитудой по квадратичному закону, а зависимость коэффициента k_f от частоты более сложная: сначала с увеличением частоты значения коэффициента растут быстрее, затем рост замедляется и значения стремятся к единице при $\omega \rightarrow \infty$. Таким образом, при больших значениях частоты ускорение коагуляции частиц при ультразвуковом воздействии будет определяться только амплитудой.

В результате совместного влияния коагуляции и испарения функция распределения частиц изменяется с течением времени. Пример расчета приведен на рис. 4, где показано влияние влажности на этот процесс.

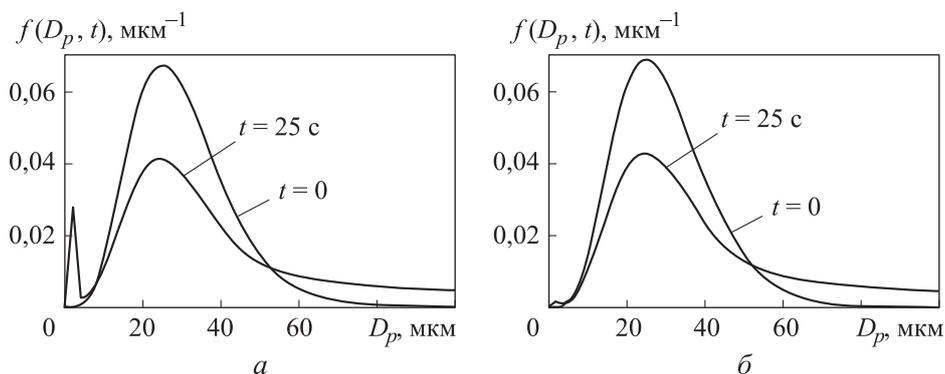


Рис. 4. Изменение функции распределения частиц по размерам в течение $t = 25$ с ($k_p = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) для $v = 0,5$ (а) и $v = 0,7$ (б)

В случае высокой влажности к 25-й секунде испарение только начинает менять функцию распределения (появляется пик в области малых размеров). Этот пик возникает за счет уменьшения размеров изначально более крупных частиц. Функция на рис. 4, б демонстрирует низкое испарение за счет высокой влажности. Коагуляция приводит к деформации спектра частиц в сторону крупных.

Согласно результатам расчета, влияние испарения на дисперсности частиц сказывается не сразу. Сначала происходит увеличение размеров частиц, «размазывание» спектра частиц в сторону более крупных, затем — довольно быстрое уменьшение размеров частиц, деформация функции распределения с появлением и ростом пика в области малых частиц. Соотношение скоростей процессов зависит от влажности, физико-химических свойств частиц, их концентрации в пространстве, коэффициента диффузии.

Заключение. Рассмотрен процесс распространения мелкодисперсных частиц в пространстве. Доказано, что для водного аэрозоля с характерным диаметром капель менее 100 мкм источник можно полагать точечным: разлет частиц в результате торможения в воздухе происходит на расстояние менее 17 см за время менее 1 мс.

Предложена математическая модель диффузионного распространения малых частиц в пространстве, осаждения на стенках и гравитационного осаждения. Получены выражения для концентрации частиц и массы осевших частиц. Показано, что динамика осаждения полидисперсного аэрозоля может аппроксимироваться кривой осаждения монодисперсного аэрозоля с диаметром частиц, равным среднему объемному диаметру.

Предложено обобщенное выражение для коэффициента скорости осаждения частиц γ (7). Установлено, что есть критический диаметр $D_{p_{cr}}$ (8), при котором функция $\gamma(D_{p_{cr}})$ имеет минимальное значение. Это соответствует минимальному осаждению аэрозоля с таким характерным размером частиц, т. е. частицы в воздухе остаются взвешенными максимально длительное время. Наличие такого экстремума физически означает, что частица недостаточно массивная и крупная, чтобы осесть под действием гравитации, и недостаточно легкая и мелкая, чтобы быстро достичь стенок за счет диффузии и осесть на них.

Исследовано уменьшение массы частиц полидисперсного аэрозоля за счет испарения и влияние влажности на динамику этого процесса. Получены аналитические выражения для оценки уменьшения массы аэрозоля с течением времени с учетом испарения и осаждения для режимов импульсной (17) и непрерывной (18) генераций.

Предложена математическая модель для описания изменения дисперсности частиц в случае одновременно протекающих процессов испарения и коагуляции на основе подхода Смолуховского в форме интегро-дифференциальных уравнений. Представлено выражение для коэффициента коагуляции, в том числе с учетом возможного внешнего ультразвукового воздействия. Приведены результаты модельных расчетов изменения спектра размеров частиц во времени для различной интенсивности испарения и коагуляции. Показано, что сначала в результате коагуляции размеры частиц растут. В некоторый момент времени испарение начинает преобладать над коагуляцией и спектр размеров частиц резко смещается в область малых размеров (происходит быстрое испарение).

Результаты работы будут полезны для дальнейшего проектирования и оптимизации систем аэрозольной очистки, увлажнения и дезинфекции воздуха.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Левин Е.В., Окунев А.Ю., Цешковская Е.Ю. Экология помещений. Влияние строительных и отделочных материалов. *Строительные материалы*, 2021, № 6, с. 41–46. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-792-6-41-46>
- [2] Rosário Filho N.A., Urrutia-Pereira M., d'Amato G., et al. Air pollution and indoor settings. *World Allergy Organ. J.*, 2021, vol. 14, iss. 1, art. 100499. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.waojou.2020.100499>
- [3] Kudryashova O.B., Muravlev E.V., Antonnikova A.A., et al. Propagation of viral bioaerosols indoors. *PLoS ONE*, 2021, vol. 16, no. 1, art. e0244983. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0244983>
- [4] González-Martín J., Kraakman N.J.R., Perez C., et al. A state-of-the-art review on indoor air pollution and strategies for indoor air pollution control. *Chemosphere*, 2021, vol. 262, art. 128376. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128376>
- [5] Andersen B.M., Rasch M., Hochlin K., et al. Decontamination of rooms, medical equipment and ambulances using an aerosol of hydrogen peroxide disinfectant. *J. Hosp. Infect.*, 2006, vol. 62, iss. 2, pp. 149–155. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2005.07.020>
- [6] Крючков А.В., Смирнов М.Б., Бакулин В.М. Технические средства для проведения аэрозольной дезинфекции помещений. *Дезинфекционное дело*, 2019, № 1, с. 5–11. EDN: YZIKIP
- [7] Мыльников И.К. Разработка технических требований к системам подавления дыма в помещениях и на путях эвакуации при пожаре. *Вестник Санкт-Петербургского университета МВД России*, 2000, № 3, с. 46–49. EDN: SWTIGH

- [8] Белоусов В.В., Бодряга В.В., Недопекин Ф.В. Подавление выбросов бурого дыма при переливах чугуна азотно-водным аэрозолем. *Вестник Донецкого национального университета. Сер. Г. Технические науки*, 2018, № 2, с. 68–72.
EDN: ZBMPSF
- [9] Кондрашин Н.А. Современные технологии увлажнения воздуха. *АВОК*, 2021, № 5, с. 52–55. EDN: UDTELZ
- [10] Semeniuk K., Dastoor A. Current state of atmospheric aerosol thermodynamics and mass transfer modeling: a review. *Atmosphere*, 2020, vol. 11, iss. 2, art. 156.
DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos11020156>
- [11] Тукмаков А.Л., Ахунов А.А. Эволюция состава и изменение характера колебаний коагулирующей газозвеси в волновом поле акустического резонатора. *ТВТ*, 2022, т. 60, № 6, с. 873–879. EDN: GAERHK.
DOI: <https://doi.org/10.31857/S0040364422050131>
- [12] Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Голых Р.Н. Метод расчета ультразвуковой коагуляции частиц размером менее 2,5 мкм в трехмерных вихревых и турбулентных акустических течениях. *Сибирский журнал индустриальной математики*, 2024, т. 27, № 1, с. 72–86.
- [13] Антонникова А.А., Коровина Н.В., Кудряшова О.Б. Ультразвуковое осаждение мелкодисперсного аэрозоля. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 2014, т. 324, № 2, с. 57–62. EDN: SALFWX
- [14] Kudryashova O.B., Pavlenko A.A., Titov S.S. Symmetry in aerosol mechanics. *Symmetry*, 2022, vol. 14, iss. 2, art. 363. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym14020363>
- [15] Хмелев В.Н., Шалунов А.В. Экспериментальное исследование коагуляции аэрозолей при формировании вихревых течений в неоднородном ультразвуковом поле. *ТВТ*, 2024, т. 62, № 2, с. 279–286.
DOI: <https://doi.org/10.31857/S0040364424020164>
- [16] Sheikhnejad Y., Aghamolaei R., Fallahpour M., et al. Airborne and aerosol pathogen transmission modeling of respiratory events in buildings: an overview of computational fluid dynamics. *Sustain. Cities Soc.*, 2022, vol. 79, art. 103704.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103704>
- [17] Kudryashova O., Shalunov A., Genne D., et al. Innovative acoustic-hydraulic method for high-performance fine liquid atomization. *Appl. Sci.*, 2023, vol. 13, iss. 22, art. 12330. DOI: <https://doi.org/10.3390/app132212330>
- [18] Kudryashova O.B., Korovina N.V., Pavlenko A.A., et al. Aerosol cloud propagation in a closed space. *J. Eng. Phys. Thermophys.*, 2015, vol. 88, pp. 568–574.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-015-1224-4>
- [19] Фукс Н.А. Испарение и рост капель в газообразной среде. М., Изд-во АН СССР, 1958.
- [20] Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М., Изд-во АН СССР, 1955.

- [21] Davies C.N., Aylward M., Leacey D. Impingement of dust from air jets. *AMA Arch. Ind. Hyg. Occup. Med.*, 1951, vol. 4, no. 4, pp. 354–397.
- [22] Thomson W. On the equilibrium of vapour at a curved surface of liquid. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, 1872, vol. 7, pp. 63–68.
DOI: <https://doi.org/10.1017/S0370164600041729>
- [23] Langmuir I. Chemical reactions at very low pressures. I. The clean-up of oxygen in a tungsten lamp. *J. Amer. Chem. Soc.*, 1913, vol. 35, iss. 2, pp. 105–127.
DOI: <https://doi.org/10.1021/ja02191a001>
- [24] Hussein T., Hruška A., Dohányosová P., et al. Deposition rates on smooth surfaces and coagulation of aerosol particles inside a test chamber. *Atmos. Environ.*, 2009, vol. 43, iss. 4, pp. 905–914. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.10.059>
- [25] Smoluchowski M. Three reports on diffusion, Brownian molecular movement and coagulation of colloid particles. *Phys. Z.*, 1916, vol. 17, no. 557–571, pp. 585–599.
- [26] Friedlander S.K. *Smoke, dust, and haze*. Oxford Univ. Press, 2000.

Кудряшова Ольга Борисовна — д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник БТИ АлтГТУ (Российская Федерация, 659305, Бийск, ул. имени Героя Советского Союза Трофимова, д. 27).

Шалунов Андрей Викторович — д-р техн. наук, заведующий кафедрой методов и средств измерений и автоматизации БТИ АлтГТУ (Российская Федерация, 659305, Бийск, ул. имени Героя Советского Союза Трофимова, д. 27).

Генне Дмитрий Владимирович — инженер кафедры методов и средств измерений и автоматизации БТИ АлтГТУ (Российская Федерация, 659305, Бийск, ул. имени Героя Советского Союза Трофимова, д. 27).

Хмелев Владимир Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры методов и средств измерений и автоматизации БТИ АлтГТУ (Российская Федерация, 659305, Бийск, ул. Трофимова, д. 27).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Кудряшова О.Б., Шалунов А.В., Генне Д.В. и др. Математическая модель эволюции аэрозоля с учетом испарения и коагуляции капель. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2025, № 3 (120), с. 4–25. EDN: LYNJNG

MATHEMATICAL MODEL OF AEROSOL EVOLUTION TAKING INTO ACCOUNT FOR EVAPORATION AND COAGULATION OF DROPS

O.B. Kudryashova

A.V. Shalunov

D.V. Genne

V.N. Khmelev

olgakudr@inbox.ru

shalunov@bti.secna.ru

gdv@bti.secna.ru

vnh@bti.secna.ru

BTI AltSTU, Biysk, Russian Federation

Abstract

To solve the problem of cleaning and disinfecting air and indoor surfaces using aerosols, it is necessary to understand the patterns of their evolution. Fine-dispersed aerosols with a large specific surface area are the most promising. The article proposes a mathematical model of aerosol propagation with droplets up to 100 μm in size in indoor air. This takes into account the processes of evaporation, diffusion, coagulation of droplets, their deposition under the influence of gravity and on the walls. The article provides analytical expressions for estimating the mass of droplets, their size and concentration in the air and on surfaces, depending on time. A parametric study of the model is carried out to assess the degree of influence of spraying conditions and physico-chemical properties of the liquid. An expression is introduced for the particle deposition rate coefficient, which depends on their size non-linearly, and a critical diameter is determined at which precipitation is minimal and particles remain in the air longer. Particle evaporation and its dependence on humidity are investigated. Analytical expressions for the change in aerosol mass over time for pulsed and continuous sources are being developed. The free parameters of the model have been experimentally determined. The results of the work can be useful for the development of aerosol cleaning and disinfection methods, optimization of such methods with respect to particle sizes under specified spraying conditions

Keywords

Fine aerosol, aerosol evolution, evaporation, coagulation, deposition

Received 09.10.2024

Accepted 15.01.2025

© Author(s), 2025

The work was financially supported by the Russian Science Foundation (grant no. 23-19-00875, <https://rscf.ru/project/23-19-00875/>)

REFERENCES

- [1] Levin E.V., Okunev A.Yu., Tseshkovskaya E.Yu. Ecology of premises. Influence of building and finishing materials. *Stroitelnye materialy* [Construction Materials], 2021, no. 6, pp. 41–46 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-792-6-41-46>
- [2] Rosário Filho N.A., Urrutia-Pereira M., d'Amato G., et al. Air pollution and indoor settings. *World Allergy Organ. J.*, 2021, vol. 14, iss. 1, art. 100499.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.waojou.2020.100499>
- [3] Kudryashova O.B., Muravlev E.V., Antonnikova A.A., et al. Propagation of viral bioaerosols indoors. *PLoS ONE*, 2021, vol. 16, no. 1, art. e0244983.
DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0244983>
- [4] González-Martín J., Kraakman N.J.R., Perez C., et al. A state-of-the-art review on indoor air pollution and strategies for indoor air pollution control. *Chemosphere*, 2021, vol. 262, art. 128376. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128376>
- [5] Andersen B.M., Rasch M., Hochlin K., et al. Decontamination of rooms, medical equipment and ambulances using an aerosol of hydrogen peroxide disinfectant. *J. Hosp. Infect.*, 2006, vol. 62, iss. 2, pp. 149–155. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2005.07.020>
- [6] Kryuchkov A.V., Smirnov M.B., Bakulin V.M. Technical means for carrying out of aerosol disinfection of premises. *Dezinfektsionnoe delo* [Disinfection Affairs], 2019, no. 1, pp. 5–11 (in Russ.). EDN: YZIKIP
- [7] Mylnikov I.K. Development of technical requirements for smoke suppression systems in premises and on evacuation routes in case of fire. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta MVD Rossii* [Bulletin of St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs of Russia], 2000, no. 3, pp. 46–49 (in Russ.). EDN: SWTIGH
- [8] Belousov V.V., Bodryaga V.V., Nedopekin F.V. Suppression of a red fume emissions at pig iron overflow by nitrogen-water aerosol. *Vestnik Donetskogo natsionalnogo universiteta. Ser. G. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Donetsk National University. Ser. G. Technical Sciences], 2018, no. 2, pp. 68–72 (in Russ.). EDN: ZBMPS
- [9] Kondrashin N.A. Modern air humidification technologies. *AVOK*, 2021, no. 5, pp. 52–55 (in Russ.). EDN: UDTELZ
- [10] Semeniuk K., Dastoor A. Current state of atmospheric aerosol thermodynamics and mass transfer modeling: a review. *Atmosphere*, 2020, vol. 11, iss. 2, art. 156.
DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos11020156>
- [11] Tukmakov A.L., Akhunov A.A. Evolution of the composition and changes in the nature of oscillations of a coagulating gas suspension in the wave field of an acoustic resonator. *High Temp.*, 2022, vol. 60, no. 6, pp. 804–811.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S0018151X22050133>
- [12] Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N. A method for calculating ultrasonic coagulation of PM2.5 particles in vortex and turbulent acoustic flows. *J. Appl. Ind. Math.*, 2024, vol. 18, no. 1, pp. 47–59. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1990478924010058>

- [13] Antonnikova A.A., Korovina N.V., Kudryashova O.B. Ultrasonic sedimentation of superfine aerosol. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2014, vol. 324, no. 2, pp. 57–62 (in Russ.). EDN: SALFWX
- [14] Kudryashova O.B., Pavlenko A.A., Titov S.S. Symmetry in aerosol mechanics. *Symmetry*, 2022, vol. 14, iss. 2, art. 363. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym14020363>
- [15] Khmelev V.N., Shalunov A.V. Experimental study of aerosol coagulation during the formation of vortex flows in a heterogeneous ultrasonic field. *High Temp.*, 2024, vol. 62, no. 2, pp. 239–245. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0018151X2470024X>
- [16] Sheikhejad Y., Aghamolaei R., Fallahpour M., et al. Airborne and aerosol pathogen transmission modeling of respiratory events in buildings: an overview of computational fluid dynamics. *Sustain. Cities Soc.*, 2022, vol. 79, art. 103704. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103704>
- [17] Kudryashova O., Shalunov A., Genne D., et al. Innovative acoustic-hydraulic method for high-performance fine liquid atomization. *Appl. Sci.*, 2023, vol. 13, iss. 22, art. 12330. DOI: <https://doi.org/10.3390/app132212330>
- [18] Kudryashova O.B., Korovina N.V., Pavlenko A.A., et al. Aerosol cloud propagation in a closed space. *J. Eng. Phys. Thermophys.*, 2015, vol. 88, pp. 568–574. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-015-1224-4>
- [19] Fuks N.A. Испарение и рост капел в газообразной среде [Evaporation and growth of drops in a gaseous medium]. Moscow, AS USSR Publ., 1958.
- [20] Fuks N.A. Механика аэрозоль [Mechanics of aerosols]. Moscow, AS USSR Publ., 1955.
- [21] Davies C.N., Aylward M., Leacey D. Impingement of dust from air jets. *AMA Arch. Ind. Hyg. Occup. Med.*, 1951, vol. 4, no. 4, pp. 354–397.
- [22] Thomson W. On the equilibrium of vapour at a curved surface of liquid. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, 1872, vol. 7, pp. 63–68. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0370164600041729>
- [23] Langmuir I. Chemical reactions at very low pressures. I. The clean-up of oxygen in a tungsten lamp. *J. Amer. Chem. Soc.*, 1913, vol. 35, iss. 2, pp. 105–127. DOI: <https://doi.org/10.1021/ja02191a001>
- [24] Hussein T., Hruška A., Dohányosová P., et al. Deposition rates on smooth surfaces and coagulation of aerosol particles inside a test chamber. *Atmos. Environ.*, 2009, vol. 43, iss. 4, pp. 905–914. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.10.059>
- [25] Smoluchowski M. Three reports on diffusion, Brownian molecular movement and coagulation of colloid particles. *Phys. Z.*, 1916, vol. 17, no. 557-571, pp. 585–599.
- [26] Friedlander S.K. Smoke, dust, and haze. Oxford Univ. Press, 2000.

Kudryashova O.B. — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Leading Researcher, BTI AltSTU (Imeni Geroya Sovetskogo Soyuza Trofimova ul. 27, Biysk, 659305 Russian Federation).

Shalunov A.V. — Dr. Sc. (Eng.), Head of the Department of Methods and Means of Measurements and Automation, BTI AltSTU (Imeni Geroya Sovetskogo Soyuza Trofimova ul. 27, Biysk, 659305 Russian Federation).

Genne D.V. — Engineer, Department of Methods and Means of Measurements and Automation, BTI AltSTU (Imeni Geroya Sovetskogo Soyuza Trofimova ul. 27, Biysk, 659305 Russian Federation).

Khmelev V.N. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Methods and Means of Measurements and Automation, BTI AltSTU (Imeni Geroya Sovetskogo Soyuza Trofimova ul. 27, Biysk, 659305 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Kudryashova O.B., Shalunov A.V., Genne D.V., et al. Mathematical model of aerosol evolution taking into account for evaporation and coagulation of drops. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2025, no. 3 (120), pp. 4–25 (in Russ.). EDN: LYNJNG