

УДК 544.773.4:519.87

СКОРОСТИ ОСАЖДЕНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ В АКУСТИЧЕСКОМ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Степкина Мария Юрьевна¹,
marbic@mail.ru

Кудряшова Ольга Борисовна¹,
olgakudr@inbox.ru

Антонникова Александра Александровна¹,
antonnikova.a@mail.ru

¹ Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН,
Россия, 659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1.

Актуальность исследования связана с поиском эффективных способов осаждения мелкодисперсных аэрозолей с целью очистки производственных помещений от пыли и дыма. Развитие методов обеспечения чистоты воздушной среды в производственных помещениях особенно актуально в связи с применением нанотехнологий, а также химических технологий, связанных с возможными выбросами вредной и опасной пыли.

Цель работы: поиск оптимальных способов осаждения мелкодисперсных аэрозолей при сравнении электростатического и ультразвукового способов осаждения частиц.

Объекты: мелкодисперсные аэрозоли и способы их осаждения.

Методы: математическое моделирование, оптические методы измерения функции распределения частиц по размерам и концентрации частиц аэрозоля с использованием лазерного измерительного комплекса ЛИД-2М и анализатора Malvern Spraytec.

Результаты. Проведен теоретический анализ скоростей осаждения частиц мелкодисперсных аэрозолей (диаметр 1–20 мкм) в присутствии акустического, электрического поля с учетом дрейфа в электрическом поле, ультразвуковой коагуляции и акустических течений («звукового ветра»). Определены ведущие механизмы осаждения частиц в зависимости от их размера, что позволяет предложить оптимальные способы осаждения мелкодисперсных аэрозолей в каждом диапазоне размеров частиц. Математическая модель акустической коагуляции основана на интегральной форме уравнения Смолуховского. Представлены результаты экспериментального исследования осаждения частиц модельного аэрозоля (NaCl) с характерным диаметром частиц около 6 мкм с помощью ультразвука и с помощью электроосаждающего устройства. Установлено, что применение данных способов осаждения существенно ускоряет седиментацию модельного аэрозоля, что соответствует теоретическим результатам. С другой стороны, теоретические расчеты предсказывают, что по сравнению с ультразвуковым способом осаждения применение электростатического способа будет более эффективно для аэрозолей с относительно более крупными частицами.

Ключевые слова:

Мелкодисперсный аэрозоль, распределение по размерам, ультразвуковая коагуляция, осаждение, электрическое поле.

Введение

Сложность очистки помещений от мелкодисперсной пыли требует поиска новых технологических решений. Чаще всего применяются электроосаждающие устройства (электрофильтры) [1–10], а также используют ультразвуковое воздействие для ускорения коагуляции частиц [11–17]. Как показано в работе [9], эффективность использования электрофильтра существенно зависит от размеров частиц, их плотности, диэлектрической проницаемости вещества частиц. Принимая решение о применении электрофильтра или ультразвуковой установки, необходимо учитывать величину скоростей осаждения, характерных для данного аэрозоля.

Механизмы действия ультразвука и электрического поля на частицы аэрозоля совершенно различны. В электрическом поле частица приобретает заряд и дрейфует к осаждающему электроду. Скорость дрейфа конкурирует со скоростью стоксовского осаждения частицы под действием силы тяжести [9]. В акустическом поле частицы колеблются, что повышает вероятность их столкновения. Это способствует коагуляции частиц, в результате

чего они быстрее осаждаются под действием силы тяжести. Другой механизм осаждения частиц в акустическом поле – увлечение под действием акустических течений [16]. Очевидно, что в разных условиях будут эффективны те или иные механизмы седиментации аэрозолей.

Сравнение электростатического и ультразвукового способов осаждения частиц аэрозолей для выявления оптимальных режимов их использования является целью данной статьи.

Теоретические расчеты скоростей осаждения частиц

Скорость стоксовского осаждения частицы диаметра D и плотности ρ_p в среде с динамической вязкостью η составит:

$$V_s = \frac{D^2 g}{18\eta} \rho_p, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения.

Скорость дрейфа частиц диаметром от 2 до 50 мкм определим по формуле [18]:

$$V_e = \frac{0,118 \cdot 10^{-10} E^2}{2\eta} D, \quad (2)$$

где E – напряженность электрического поля, зависящая от расположения электродов электрофильтра, линейной плотности тока короны и диэлектрической проницаемости вещества частиц.

При осаждении пыли ультразвуковым излучателем действуют два механизма. Один из них – увлечение частиц акустическим течением (действует не только на ультразвуковых частотах, но и на более низких звуковых). Скорость движения частицы под действием акустического течения определим по формуле [16]:

$$V_w = \frac{PD}{12\eta}, \quad (3)$$

где P – давление звукового излучения. Давление звукового излучения P в бегущей волне связано со звуковым давлением p следующим соотношением:

$$P = \frac{2p^2}{\rho c^2}, \text{ где } c - \text{ скорость звука; } \rho - \text{ плотность среды.}$$

Другой механизм осаждения частиц при ультразвуковом воздействии – это укрупнение частиц за счет коагуляции и последующее гравитационное осаждение. Коагуляция частиц полидисперсного аэрозоля описывается уравнением Смолуховского. Кинетика коагуляции аэрозолей подробно описана в книге [19]. В работах [16, 17] эти уравнения проанализированы применительно к мелкодисперсному аэрозолю. Следуя [16, 17], запишем уравнение Смолуховского, описывающее изменение функции распределения частиц по размерам со временем для твердофазного аэрозоля:

$$\frac{\partial f(D, t)}{\partial t} = I_1 + I_2, \quad (4)$$

где I_1 описывает уменьшение количества частиц с диаметром D в единицу времени в единице объема за счет столкновения частицы диаметра D с частицей диаметра D_1 :

$$I_1 = -f(D, t) \int_0^{D_{\max}(t)} K(D, D_1) f(D_1, t) dD_1, \quad (5)$$

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

$$D_{\max} = \sqrt{\frac{9\eta H}{2g\rho_p t}}, \text{ где } H - \text{ верхняя граница облака.}$$

Все частицы, масса которых превышает максимальное значение $D_{\max}(t)$, седиментировали; функция распределения частиц по размерам в каждый момент времени t будет обрезана справа за счет седиментации крупных частиц, причем постепенно эта граница будет смещаться в сторону все более мелких частиц [19].

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

$$I_2 = \frac{1}{2} \int_0^D K(D-D_1, D_1) f(D_1, t) f(D-D_1, t) dD_1. \quad (6)$$

Вероятность столкновений частиц в присутствии акустического поля опишется уравнением:

$$K(D, D_1) = \frac{k_b n_0 \rho}{\eta} (D^2 + D_1^2) \left(1 + k_a U^2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \right)^2 \right), \quad (7)$$

где ω – частота акустического поля; U – колебательная скорость движения частиц в поле, пропорциональная амплитуде воздействия; n_0 – начальная концентрация частиц аэрозоля; k_a и k_b – коэффициенты пропорциональности; $\tau = \rho_p D^2 / 18\eta$ – время стоковской релаксации частицы.

Из анализа выражения (7) следует, что с повышением интенсивности воздействия (которая ведет к повышению скорости колебательного движения частиц) растет вероятность столкновений [16, 17]. Следовательно, ускоряется коагуляция частиц. С другой стороны, существует некоторая оптимальная частота ω для каждого диаметра частиц, при которой повышение вероятности столкновений будет максимальным. При дальнейшем повышении частоты $K(D, D_1)$ больше не растет, асимптотически приближаясь к предельному значению. Для каждого диаметра частиц также существует минимальная частота воздействия, ниже которой вероятность столкновений не увеличивается в акустическом поле. Например, для частиц с диаметром 1–2 мкм минимальная частота воздействия составит приблизительно 10–15 кГц, а оптимальная – более 100 кГц, что лежит за пределами возможностей ультразвуковых излучателей для газовых сред.

Решая численно уравнения (4)–(6), получаем время полного осаждения аэрозоля, частицы которого подчиняются функции распределения $f(D)$. Для сравнения результатов расчетов скоростей осаждения, соответствующих перечисленным механизмам, для полидисперсного аэрозоля примем в качестве характерной величины средний объемно-поверхностный диаметр частиц D_{32} .

Экспериментальное исследование скоростей осаждения частиц

В качестве модельной аэрозольной среды выбран аэрозоль NaCl с начальным средним объемно-поверхностным диаметром частиц D_{32} около 6 мкм. Для создания такого аэрозоля в камере объемом 1 м³ с помощью пневматического устройства распылялся насыщенный раствор соли в количестве 10 г. Через 2 минуты после испарения воды в воздухе остается аэрозоль NaCl равномерной концентрации. После этого включался источник акустического излучения либо (в других экспериментах) источник электрического поля в течение 10 минут. Измерение дисперсных характеристик и концентрации частиц аэрозоля производилось с помощью оптических методов (малоуглового рассеяния и спектральной прозрачности [20]; погрешность измерения менее 15 %). Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Акустическое воздействие в эксперименте обладало следующими характеристиками: уровень звукового давления 140 дБ, частота 28 кГц (УЗКС

«Соловей»). Конструктивные параметры электрофильтра, используемого в эксперименте, следующие: площадь осаждения 1000 мм²; длина коронирующего элемента, длина активной зоны – 0,085 м; расстояние между коронирующими электродами – 0,01 м; расстояние между плоскостями коронирующих и осадительных электродов – 0,005 м; радиус коронирующего электрода – 0,004 м; среднее напряжение на электродах – 8000 В, мощность электрофильтра – 20 Вт.

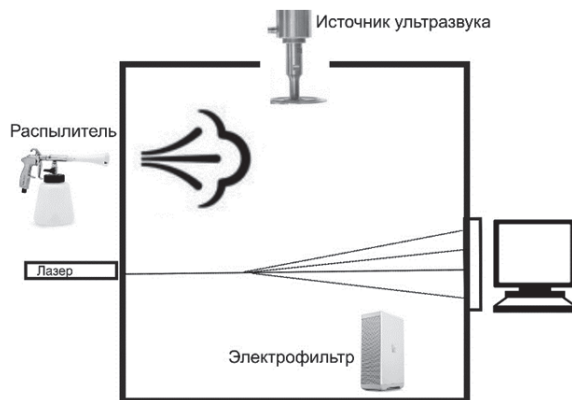


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Fig. 1. Scheme of the experimental set

Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведены расчетные значения скоростей осаждения частиц, соответствующие различным механизмам. Скорость гравитационного осаждения V_s рассчитана по формуле (1), скорость дрейфа в электрическом поле V_e – по формуле (2), скорость движения частиц под действием акустического течения V_w – по формуле (3), скорость осаждения за счет акустической коагуляции V_{uz} получена из численного решения уравнения (4).

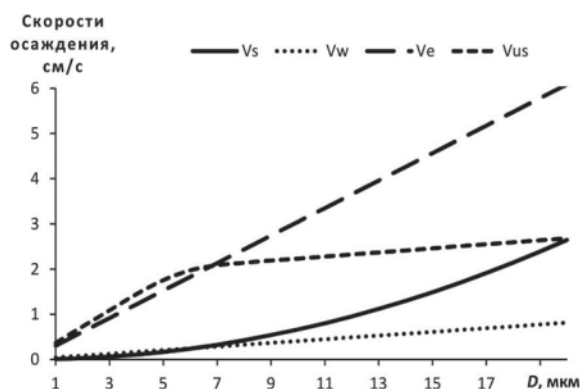


Рис. 2. Расчетные значения скорости осаждения частиц в соответствии с различными механизмами (гравитационное осаждение, акустическое течение, дрейф в электрическом поле, ультразвуковая коагуляция) в зависимости от диаметра частиц

Fig. 2. Calculated values of deposition rate of particles according to various mechanisms (gravity sedimentation, acoustic flow, drift in electric field, ultrasonic coagulation) depending on diameter of particles

Рассматривая самые «медленные» механизмы осаждения: естественное гравитационное и с помощью акустического течения, можно отметить, что малые частицы (для NaCl в воздухе – с диаметром менее 6 мкм) быстрее «сдуваются звуковым ветром», чем осаждаются в поле силы тяжести. Значит, расположенный выше облака аэрозоля источник звука позволит осадить частицы быстрее, чем они осадут сами.

Ультразвуковая коагуляция происходит тем интенсивнее, чем выше частота ультразвука (7). К эффекту укрупнения частиц под действием ультразвука добавляется воздействие акустического течения. Результат расчетов мы видим на рис. 2 (короткий пунктир). Начиная с некоторого достаточно крупного размера частиц (в нашем примере NaCl это диаметр около 18 мкм) ультразвуковое осаждение не может конкурировать с естественным гравитационным и становится бесполезным.

Для малых размеров частиц (диаметром менее 6 мкм) эффект от ультразвукового воздействия несколько больше, чем от воздействия электрическим полем. Но для более крупных частиц скорость дрейфа в электрическом поле значительно выше, чем для других механизмов осаждения.

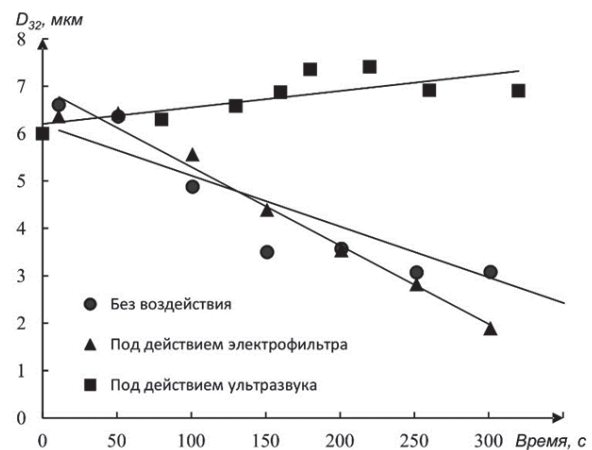


Рис. 3. Изменение среднего объемно-поверхностного диаметра частиц NaCl со временем в экспериментах с воздействием электрического поля, ультразвука и в контрольном эксперименте без воздействия

Fig. 3. Change of effective volumetric surface diameter of NaCl particles with time in experiments with influence of electric field, ultrasound and in check experiment without influence

На рис. 3 приведены измеренные значения среднего объемно-поверхностного диаметра частиц в экспериментах с ультразвуковым воздействием, с электрофильтром и без воздействия (гравитационное осаждение). Влияние электрофильтра не ведет к укрупнению частиц, более того, средний размер частиц со временем уменьшается быстрее, чем в контрольном эксперименте. Это объясняется тем, что более крупные частицы осаждаются электрофильтром быстрее, а в воздухе остаются более мелкие частицы, и этот процесс

идет быстрее, чем при естественном осаждении. В случае ультразвукового воздействия рис. 3 демонстрирует увеличение размеров частиц за счет коагуляции.

На рис. 4 приведены кривые уменьшения относительной массовой концентрации частиц $C_m = m/m_0$, где m – масса частиц в момент времени t ; m_0 – начальная масса частиц.

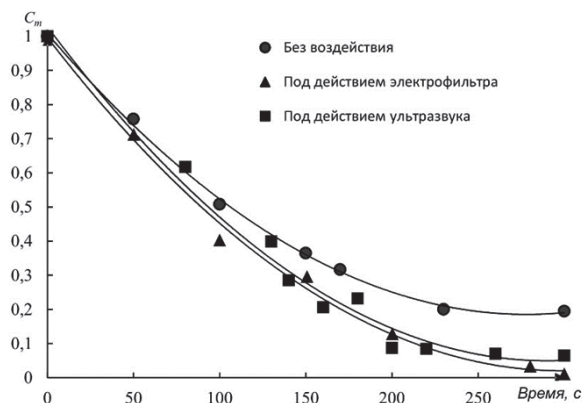


Рис. 4. Изменение относительной массовой концентрации аэрозоля NaCl со временем в экспериментах с воздействием электрического поля, ультразвука и в контрольном эксперименте без воздействия

Fig. 4. Change of relative weight concentration of NaCl aerosol with time in experiments with influence of electric field, ultrasound and in check experiment without influence

Как показывают расчеты (рис. 2), скорость осаждения частиц диаметром 6 мкм в электрическом и акустическом поле примерно одинакова, но выше, чем скорость гравитационного осаждения. Действительно, в экспериментах с воздействием

через 10 минут в воздухе практически не наблюдалось частиц, а без воздействия массовая концентрация частиц через 10 минут после распыления все еще оставалась 20 % от первоначальной.

Выводы

Приведены расчеты характерных скоростей осаждения мелкодисперсных аэрозолей под действием электрического поля, ультразвукового поля, акустических течений и гравитационного осаждения (без воздействия). Расчеты показали, что осаждение мелкодисперсных частиц электрофильтром эффективно для относительно более крупных частиц (в примере с NaCl – более 6 мкм). Ультразвуковое осаждение эффективно по сравнению с гравитационным для частиц диаметром менее 18 мкм, более крупные частицы и в поле силы тяжести быстро седиментируют. Акустическое течение – наименее значимый механизм осаждения из рассмотренных. Он помогает осадить самые мелкие частицы (для NaCl – менее 3 мкм).

Проведены эксперименты с модельным аэрозолем NaCl с характерным диаметром частиц 6 мкм с применением электроосаждающего устройства либо источника ультразвука. И то и другое воздействие существенно ускоряют процесс осаждения, причём скорость осаждения увеличивается примерно одинаково в обоих случаях, что подтверждает приведенные расчеты.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-10209).

Работа выполнена при использовании приборной базы Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Архипов В.А., Шереметьева У.М. Аэрозольные системы и их влияние на жизнедеятельность. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 136 с.
- Санаев Ю.И. Обеспыливание газов электрофильтрами. – Семипалатинск: Изд-во «Кондор-Эко», 2009. – 163 с.
- Уайт П. Высокоэффективная очистка воздуха. – М.: Атомиздат, 1967. – 311 с.
- Kim S.H., Lee K.W. Experimental study of electrostatic precipitator performance and comparison with existing theoretical prediction models // Journal of Electrostatics. – 1999. – № 48. – P. 3–25.
- Bohm J. Electrostatic precipitators. – Amsterdam: Elsevier Science Publishers Company, 1982. – 366 p.
- Oglesby S. Jr., Nichols G.B. Electrostatic precipitation. – New York: Marcel Dekker Inc., 1978. – 342 p.
- Robinson M. Electrostatic precipitation // Air pollution control / Ed. by W. Strauss. – New York: Wiley Interscience, 1971. – P. 256–281.
- Rose H.E., Wood A.J. Electrostatic precipitation in theory and practice. – London: Constable & Company Ltd, 1956. – 50 p.
- Степкина М.Ю., Кудряшова О.Б. Управление процессом осаждения конденсируемой фазы с использованием электрического поля // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 5. – С. 28–37.
- Степкина М.Ю., Ахмадеев И.Р., Ворожцов Б.И. Экспериментальное исследование способа ускорения осаждения мелкодисперсного аэрозольного облака под действием электрического поля // Ползуновский вестник. – 2014. – № 3. – С. 134–138.
- Ultrasonic radiators for the action on gaseous media at high temperatures / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, V.A. Nesterov, R.S. Dorovskikh, R.N. Golykh // EDM 2015: Works of 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices – Novosibirsk, 2015. – P. 224–228.
- Ultrasonic coagulation to improve the efficiency of the gas cleaning systems / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.S. Dorovskikh, V.A. Nesterov, R.N. Golykh, I.S. Kozhevnikov // EDM 2017: Works of 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – Novosibirsk, 2017. – P. 324–331.
- Development of high efficiency gas-cleaning equipment for industrial production using high-intensity ultrasonic vibrations / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.S. Dorovskikh, R.N. Golykh, V.A. Nesterov // American Journal of Engineering Research (AJER). – 2015. – V. 04. – № 08. – P. 108–119.
- Хмелев В.Н., Кузовников Ю.М., Хмелев М.В. Ультразвуковые аппараты для научных исследований // Южно-Сибирский научный вестник. – 2017. – № 1 (17). – С. 5–13.
- Ультразвуковая коагуляция в системах газоочистки / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.С. Доровских, В.А. Нестеров, Р.Н. Голых // Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы: Труды Международной научной конференции – Витебск, 2016. – С. 94–96.
- Mechanisms of Aerosol Sedimentation by Acoustic Field / O.B. Kudryashova, A.A. Antonnikova, N.V. Korovina,

- I.R. Akhmadeev // Archives of Acoustics. – 2015. – V. 40. – № 4. – P. 485–489.
17. Антонникова А.А., Коровина Н.В., Кудряшова О.Б. Ультразвуковое осаждение мелкодисперсного аэрозоля // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 2. – С. 57–62.
18. Ужов В.Н. Очистка промышленных газов электрофильтрами. – М.: Химия, 1967. – 344 с.
19. Волощук В.М. Кинетическая теория коагуляции. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 284 с.
20. Remote optical diagnostics of nonstationary aerosol media in a wide range of particle sizes / O.B. Kudryashova, A.A. Pavlenko, B.I. Vorozhtsov, S.S. Titov, V.A. Arkhipov, S.S. Bondarchuk, E.V. Maksimenko, I.R. Akhmadeev, E.V. Muravlev // Photodetectors. – Rijeka, Croatia: InTech, 2012. – P. 341–364.

Поступила 21.12.2017 г.

Информация об авторах

Степкина М.Ю., кандидат технических наук, младший научный сотрудник Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН.

Кудряшова О.Б., доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН.

Антонникова А.А., кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН.

UDC 544.773.4:519.87

SEDIMENTATION RATES OF FINE AEROSOLS IN ACOUSTIC AND ELECTRIC FIELD

Maria Yu. Stepkina¹,

marbic@mail.ru

Olga B. Kudryashova¹,

olgakudr@inbox.ru

Alexandra A. Antonnikova¹,

antonnikova.a@mail.ru

¹ Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1, Sotsialisticheskaya street, Biysk, 659322, Russia.

The relevance of the research is related to searching the efficient ways of deposition of fine aerosols to clean production rooms from dust and smoke. Development of methods of ensuring purity of air environment in production rooms are especially relevant in connection with the development of nanotechnologies as well as engineering chemistries, related to possible emissions of harmful and dangerous dust.

The main aim of the research is searching for optimum ways of deposition of fine aerosols comparing electrostatic and ultrasonic deposition of particles.

Objects of the research are fine aerosols and ways of their deposition.

Methods: mathematical modeling, optical methods of measurement of distribution function of particles by the sizes and concentration of aerosol particles using the laser measuring system LID2M and the Malvern Spraytec analyzer.

Results. The authors have carried out the theoretical analysis of sedimentation rates of particles of fine aerosols (diameter of particles ~1–20 μm) in the presence of acoustic, electric field taking into account a drift in electric field, ultrasonic coagulation, and acoustic flows («sound wind»). The key mechanisms of particles deposition depending on their size are defined that allows proposing the optimum ways of deposition of fine aerosols in each range of particle sizes. The mathematical model of acoustic coagulation is based on an integral form of the equation of Smolukhovskiy. The paper introduces the results of the experimental study of the model aerosol (NaCl) particles deposition with the reference diameter of particles about 6 μm by means of ultrasound and electrodeposition device. It is defined that application of these ways of deposition is essential (and it is approximately identical) and it accelerates considerably sedimentation of the model aerosol that corresponds to theoretical results. On the other hand, theoretical calculations predict that application of electrostatic way of deposition will be more effective in comparison with the ultrasonic one for aerosols with rather larger particles.

Key words:

Fine aerosol, size distribution, ultrasonic coagulation, sedimentation, electric field.

The research was carried out due to the Russian Science Foundation (grant 17–79–10209).

The research was carried out using instruments of Biysk common use regional center of the RAS (Biysk).

REFERENCES

1. Arkhipov V.A., Sheremeteva U.M. *Aerolozhnye sistemy i ikh vliyaniye na zhiznideyatelnost* [Aerosol systems and their influence on activity]. Tomsk, TGPU Press, 2007. 136 p.
2. Sanaev Yu.I. *Obespylyvaniye gazov elektrofiltrami* [Dust removal of gases with electric precipitators]. Semibratovo, Kondor-Eko Publ., 2009. 163 p.
3. Uayt P. *Vysokoeffektivnaya ochistka vozdukha* [Highly effective air purification]. Moscow, Atomizdat Publ., 1967. 311 p.
4. Kim S.H., Lee K.W. Experimental study of electrostatic precipitator performance and comparison with existing theoretical prediction models. *Journal of Electrostatics*, 1999, no. 48, pp. 3–25.
5. Bohm J. *Electrostatic precipitators*. Amsterdam, Elsevier Science Publishers Company, 1982. 366 p.
6. Oglesby S. Jr., Nichols G.B. *Electrostatic precipitation*. New York, Marcel Dekker Inc., 1978. 342 p.
7. Robinson M. *Electrostatic precipitation Air pollution control*. Ed. by W. Strauss. New York, Wiley Interscience, 1971. pp. 256–281.
8. Rose H.E., Wood A.J. *Electrostatic precipitation in theory and practice*. London, Constable & Company Ltd, 1956. 50 p.
9. Stepkina M.Yu., Kudryashova O.B. Control of condensed phase sedimentation using the electric field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no 5, pp. 28–37. In Rus.
10. Stepkina M.Yu., Akhmadeev I.R., Vorozhtsov B.I. Experimental study of a way of acceleration of a deposition of a fine aerosol cloud under the influence of an electric field. *Polzunovskiy vestnik*, 2014, no. 3, pp. 134–138. In Rus.
11. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A., Dorovskikh R.S., Golykh R.N. Ultrasonic radiators for the action on gaseous media at high temperatures. *Works of 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices «EDM 2015»*. Novosibirsk, 2015. pp. 224–228.
12. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Dorovskikh R.S., Nesterov V.A., Golykh R.N., Kozhevnikov I.S. Ultrasonic coagulation to improve the efficiency of the gas cleaning systems. *Works of 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices «EDM 2017»*. Novosibirsk, 2017. pp. 324–331.
13. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Dorovskikh R.S., Golykh R.N., Nesterov V.A. Development of high efficiency gas-cleaning equipment for industrial production using high-intensity ultrasonic vibrations. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 2015, vol. 04, no. 08, pp. 108–119.
14. Khmelev V.N., Kuzovnikov Yu.M., Khmelev M.V. Ultrasonic devices for scientific research. *Uzhno-Sibirskiy vestnik*, 2017, no. 1 (17), pp. 5–13. In Rus.

15. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Dorovskikh R.S., Nesterov V.A., Golykh R.N. Ul'trozvukovaya koagulyatsiya v sistemakh gazo-ochistki [Ultrasonic coagulation in gas purification systems]. *Tekhnicheskaya akustika: razrabotki, problemy, perspektivy. Trudy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Proc. Int. scientific conf. Applied acoustics: developments, problems, prospects]. Vitebsk, 2016. pp. 94–96.
16. Kudryashova O.B., Antonnikova A.A., Korovina N.V., Akhmadeev I.R. Mechanisms of Aerosol Sedimentation by Acoustic Field. *Archives of Acoustics*, 2015, vol. 40, no. 4, pp. 485–489.
17. Antonnikova A.A., Korovina N.V., Ultrasonic deposition of fine aerosol. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 2, pp. 57–62.
18. Uzhov V.N. *Ochistka promyshlennykh gazov elektrofiltrami* [Purification of industrial gases with electric precipitators]. Moscow, Khimiya Publ., 1967. 344 p.
19. Voloshchuk V.M. *Kineticheskaya teoriya koagulyatsii* [Kinetic theory of coagulation]. Leningrad, Gydrometeoizdat Publ., 1984. 284 p.
20. Kudryashova O.B., Pavlenko A.A., Vorozhtsov B.I., Titov S.S., Arkhipov V.A., Bondarchuk S.S., Maksimenko E.V., Akhmadeev I.R., Muravlev E.V. Remote optical diagnostics of nonstationary aerosol media in a wide range of particle sizes. *Photodetectors*. Rijeka, Croatia, InTech, 2012. pp. 341–364.

Received: 21 December 2017.

Information about the authors

Maria Yu. Stepkina, Cand. Sc., junior researcher, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Olga B. Kudryashova, Dr. Sc., senior researcher, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Alexandra A. Antonnikova, Cand. Sc., researcher, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.