

УДК 53.072.621.317.329:53.097:538.9:51–74

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ОСАЖДЕНИЯ КОНДЕНСИРУЕМОЙ ФАЗЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Степкина Мария Юрьевна,

аспирант, мл. науч. сотр. лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Россия, 659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1.
E-mail: mabric@mail.ru

Кудряшова Ольга Борисовна,

д-р физ.-мат. наук, доцент, ст. науч. сотр. лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Россия, 659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1. E-mail: olgakudr@inbox.ru

Актуальность работы связана с исследованием эффективности использования электрического поля для осаждения конкретных веществ с целью очистки помещения от аэрозольных загрязнений. Развитие методов обеспечения чистоты среды и поверхности в закрытых рабочих помещениях, особенно в условиях развивающихся технологий производства, медицины и условий жизнеобеспечения человека, всегда актуальны и своевременны.

Цель работы: экспериментальное и теоретическое исследование процесса осаждения при взаимодействии электрического поля с частицами мелкодисперсных аэрозолей и разработка на основе этих исследований эффективных способов сбора различных вредных веществ из воздуха и очистки поверхности рабочих помещений.

Методы исследования: оптическая диагностика аэрозоля, основанная на методе малоуглового рассеяния с использованием лазерного измерительного комплекса ЛИД-2М и технологии лазерной дифракции (анализатор Malvern Spraytec); тензометрический метод измерения веса; эжекционный метод распыления; метод механического измельчения диспергируемых порошков.

Результаты. Показана зарядка аэрозольных частиц при возникновении коронного разряда. Проведены экспериментальные исследования распыления модельных веществ с воздействием на них электрического поля и без него. Получены результаты изменения дисперсности и массовой концентрации продуцируемого аэрозоля в ходе эксперимента с помощью лазерной измерительной установки ЛИД-2М. В результате экспериментально установлено, что скорость осаждения аэрозольных частиц при воздействии электрического поля увеличивается в несколько раз, но не для всех исследуемых веществ – так, крупные частицы аэросила быстрее осадут под действием гравитации. Проведен расчет характерных скоростей, возникающих в процессе эволюции аэрозоля, для модельных веществ. Представлен сравнительный анализ скоростей конвективного распространения частиц в пространстве, гравитационного осаждения и дрейфа частиц аэрозольного облака под действием электрических сил. На основе данного анализа можно установить, насколько эффективно использование электрического поля для осаждения конкретного вещества с определенной дисперсностью. Полученные расчетным путем данные следует также учитывать при проектировании новых установок электрофильтров.

Ключевые слова:

Аэрозольное облако, конденсированная фаза, коронный разряд, гравитационное осаждение, скорость дрейфа частиц, коэффициент диффузии, электростатическое поле.

Один из известных способов осаждения аэрозолей, в том числе вредных и опасных, основан на применении электрического поля. При этом эффективность воздействия электрического поля на аэрозоли различных физико-химических свойств и дисперсности может быть различна. Цель данной работы – с помощью экспериментальных исследований и теоретических расчетов характерных скоростей установить, в каких именно случаях применение электрического поля будет эффективным для осаждения аэрозолей.

Зарядка аэрозольных частиц под действием электрического поля происходит при возникновении коронного разряда между электродами (рис. 1). При этом выделяют две характерные зоны. Активная зона (зона чехла короны) предполагает активный ионизационный процесс столкновения нейтральных частиц аэрозоля с заряженными ионами, покидающими коронирующий электрод. Вторая – это пассивная зона, представляющая со-

бой все межэлектродное пространство, за исключением зоны чехла короны, в которой частицы движутся по силовым линиям и продолжают взаимодействовать с частицами воздуха. Напряженность, при которой возникает коронный разряд, называется критической [1–4]. Величина критической напряженности для отрицательной короны, учитывая конструктивные параметры используемого электрофильтра, определяется по эмпирической формуле Пика [5]:

$$E_0 = 3,04 \left(\beta + 0,0311 \sqrt{\frac{\beta}{R_1}} \right) 10^6, \quad (1)$$

где R_1 – радиус коронирующего электрода; β – относительная плотность газов.

Отношение плотности газов в рабочих условиях к их плотности в стандартных условиях (при температуре 20 °С и давлении $1,013 \cdot 10^5$ Н/м²) определяет относительную плотность газов [5]:

$$\beta = \frac{A \pm p_i}{1,013 \cdot 10^5} \cdot \frac{273 + 20}{273 + t},$$

где t – температура; $B \pm p_i$ – абсолютное давление газов, для воздуха $1,01325 \cdot 10^5$ Н/м².

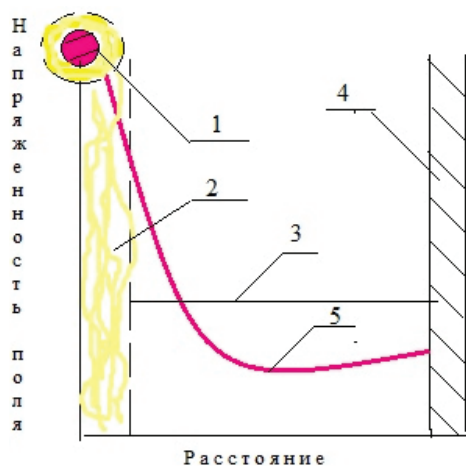


Рис. 1. Зоны короны и изменения напряженности в межэлектродном промежутке: 1) коронирующий электрод; 2) активная зона; 3) пассивная зона; 4) внешний заземленный электрод; 5) зависимость напряженности от координат

Fig. 1. Crown regions and changes in stress in interelectrode gap: 1) corona electrode; 2) active zone; 3) passive zone; 4) external ground electrode; 5) stress coordinate dependence

Экспериментальное исследование

При экспериментальном исследовании воздействия электрического поля на аэрозольную среду в качестве модельных веществ, подвергаемых диспергированию, приняты следующие: насыщенный раствор соли, мелкодисперсный порошок аэросила, тальковая пыль. Выбор данных веществ обусловлен следующим. Известно [6], что вдыхание пыли аэросила и накопление ее в легких может вызывать заболевание – силикоз. Вдыхание пыли таль-

ка в больших объемах может вызывать талькоз – доброкачественное заболевание из группы пневмокониозов. Поэтому особенно важно исследовать способы фильтрации таких веществ для сохранения здоровья человека, имеющего непосредственный контакт с подобными аэрозолями.

При проведении эксперимента по осаждению конденсированной фазы аэрозольной среды контролировались дисперсность и концентрация изучаемого аэрозоля, как во времени, так и в пространстве. Для этих целей использовали лазерную измерительную установку ЛИД-2М, разработанную в ИПХЭТ СО РАН [7, 8].

В качестве устройства для создания электрического поля использовался электрофильтр, внутреннее устройство которого показано на рис. 2 [9].

В качестве устройств диспергирования выбран краскопульт для распыления насыщенного раствора соли и пескоструй для распыления твердофазных веществ.

Полный лабораторный стенд для проведения экспериментальных исследований приведен на рис. 3.

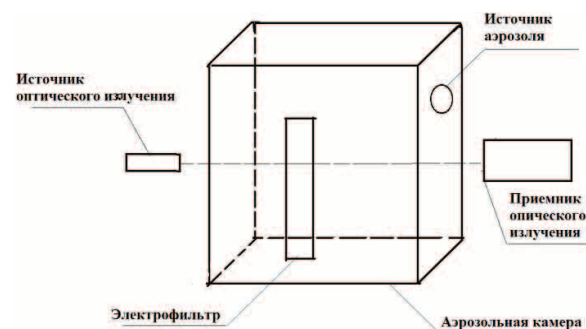


Рис. 3. Схема экспериментального стенда

Fig. 3. Test bench diagram

Первая серия экспериментов проводится при нормальных условиях, без каких-либо внешних воздействий, после чего проводятся эксперименты с использованием электрофильтра.

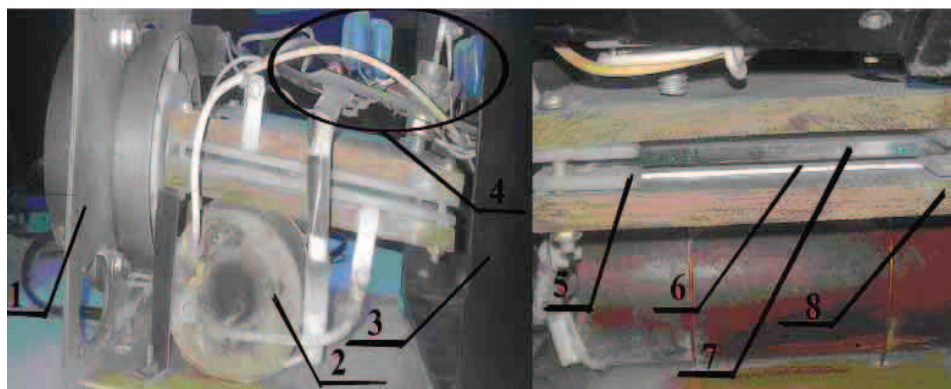


Рис. 2. Внутреннее устройство используемого в эксперименте электрофильтра: 1) вентилятор; 2) автомобильная катушка; 3) корпус прибора; 4) схема регулировки; 5) пластмассовые клеммы; 6) металлические электроды; 7) стеклянная пластина; 8) активная зона

Fig. 2. Internal design of the electrical filter used in the experiment: 1) fan; 2) vehicle coil; 3) device body; 4) adjustment scheme; 5) plastic terminals; 6) metal electrodes; 7) glass plate; 8) active zone

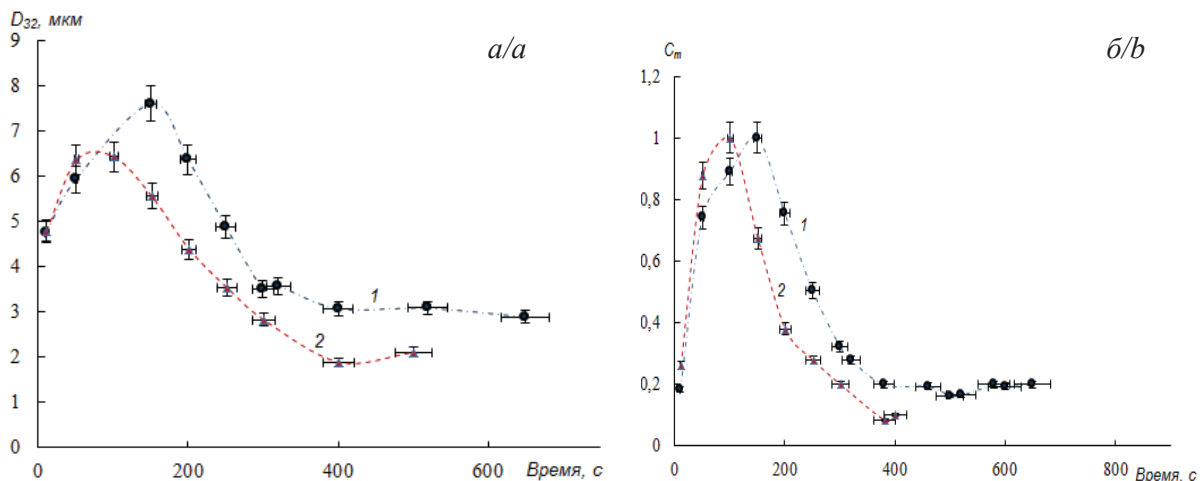


Рис. 4. Зависимость среднего объемно-поверхностного диаметра D_{32} (а) и относительной концентрации частиц аэрозоля C_m (б) от времени для насыщенного раствора соли: 1) без воздействий; 2) при воздействии электрического поля

Fig. 4. Dependence of average space-volumetric diameter D_{32} (a) and relative concentration of C_m (b) aerosol particles on time for saturated salt solution: 1) without; 2) with electric field

Время распыления насыщенного раствора соли массой 10 г составило 35 с. На второй минуте после распыления насыщенного раствора соли, когда в воздушной среде остались преимущественно частички соли (вода испарилась), включается электрофильтр. Время воздействия электрофильтра на аэрозоль составило 7 мин. Результаты экспериментальных измерений на установке ЛИД-2М для насыщенного раствора соли представлены на рис. 4.

Масса мелкодисперсного порошка аэрозоля составила 3 г, время распыления – 20 с. При проведении экспериментов с воздействием электрофильтра, который был включен сразу после момента распыления аэрозоля, время его работы составило 5 минут. Изменение среднего объемно-поверхностного диаметра D_{32} и относительной концентрации C_m в процессе эксперимента при воздействии и без влияния электрофильтра для аэрозоля представлено на рис. 5.

Как показано на рис. 5, б относительная концентрация аэрозоля на первых минутах эксперимента с воздействием электрофильтра и без него незначительно отличаются, но аэрозольные частицы дольше задерживаются в среде, в то время как осаждаются эти частицы под действием гравитации уже при $t > 1000$ с [10].

В экспериментах при распылении присыпки из талька массой 3 гр за 10 с электрофильтр был включен через 40 с после распыления на 7 минут. Результаты эксперимента представлены на рис. 6 [11].

Как следует из проведенных экспериментов, электрическое поле быстрее осаждаёт частицы меньших размеров (солевой раствор, отчасти тальк), а более крупные частицы (аэросил) осаждаются под действием гравитации. Чтобы оценить влияние различных процессов на динамику частиц аэрозоля под действием электрического поля, проведем расчеты характерных скоростей этих процессов.

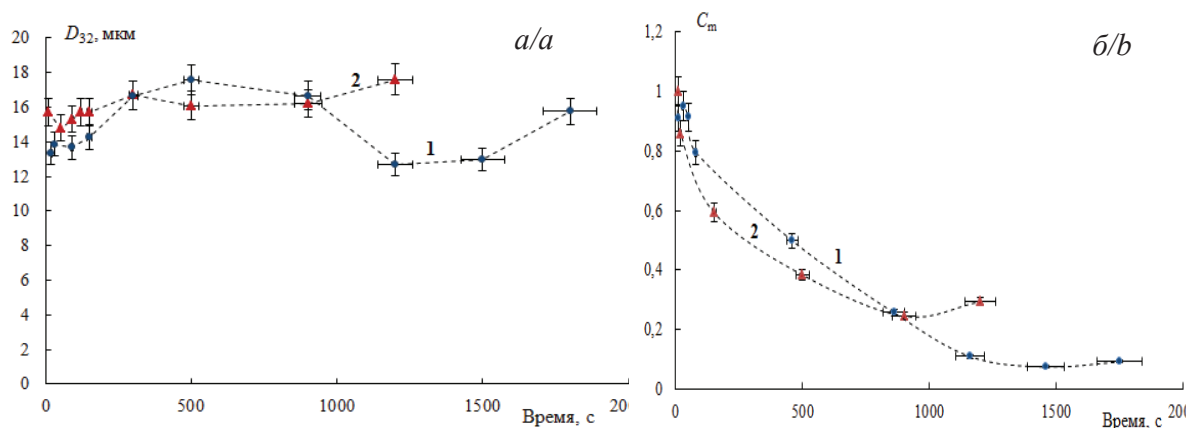


Рис. 5. Зависимость среднего объемно-поверхностного диаметра D_{32} (а) и относительной концентрации частиц C_m (б) от времени для аэрозоля: 1) без воздействий; 2) при воздействии электрического поля

Fig. 5. Dependence of average space-volumetric diameter D_{32} (a) and relative concentration of C_m aerosol particles (b) on time for aerosil: 1) without; 2) with electric field

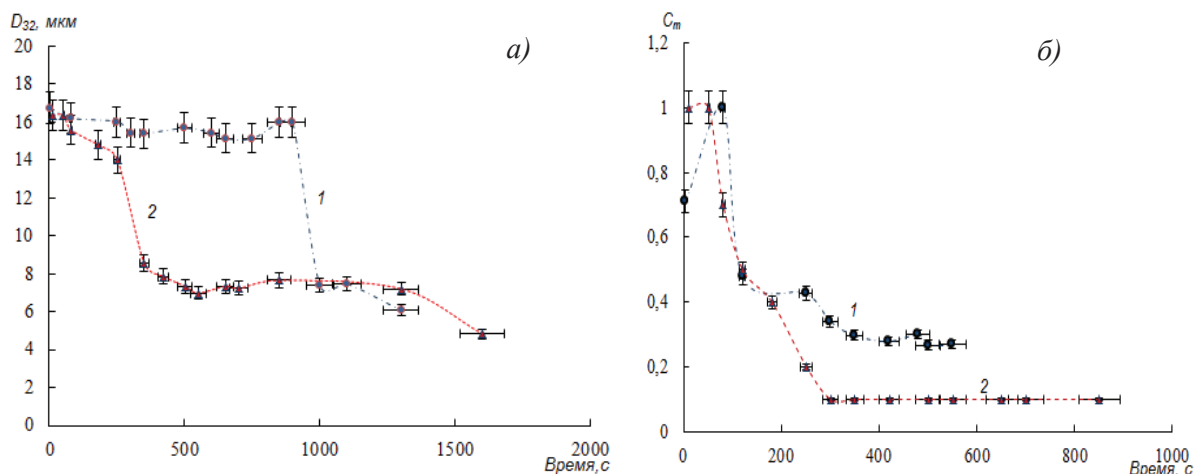


Рис. 6. Зависимость среднего объемно-поверхностного диаметра D_{32} (а) и относительной концентрации частиц C_m (б) от времени для тальковой пудры: 1) без воздействий; 2) при воздействии электрического поля

Fig. 6. Dependence of average space-volumetric diameter D_{32} (а) and relative concentration of C_m aerosol particles (б) on time for talk powder: 1) without; 2) with electric field

Теоретические расчеты

Эволюция аэрозольного облака происходит за счет дрейфа частиц под действием электрических сил, а также за счет гравитационного осаждения частиц и конвективной диффузии. Какой механизм воздействия на конкретное вещество определенной дисперсности является ведущим, предстоит выявить с помощью математических соотношений.

Целесообразно начать с простейшего случая – равномерного движения частиц под действием гравитационной силы. Наиболее изучено как теоретически, так и экспериментально движение шарообразных частиц.

Стационарная скорость оседания частиц выражается формулой Стокса [12]:

$$V_0 = -\frac{2r^2g(\rho - \rho_g)}{9\mu_g}, \quad (2)$$

где μ_g – коэффициент динамической вязкости газа; r – радиус частицы; V_0 – скорость оседания частиц; g – ускорение свободного падения; ρ, ρ_g – плотности частицы и среды соответственно.

Движение аэрозольных частиц, находящихся в униполярной ионной атмосфере при отсутствии внешнего электрического поля, во многом определяется диффузией ионов. Для оценки времени диффузионного распространения частиц в пространстве необходимо решить задачу о диффузии аэрозоля и экспериментально определить коэффициент диффузии. Коэффициент броуновской диффузии взвешенных в воздухе частиц определяется соотношением Эйнштейна–Смолуховского, формула [13, 14]:

$$D_b = \frac{kT}{6\pi\mu_g r}, \quad (3)$$

где $k=1,384 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура.

Однако на практике броуновским движением самих частиц при распространении аэрозольного облака пренебрегают, так для частиц радиусом $r_p \approx 10$ мкм коэффициент броуновской диффузии, согласно (3), имеет порядок $D_b \sim 10^{-12}$ м²/с. При этом значении коэффициента диффузии за время порядка нескольких часов аэрозольное облако не распространилось бы заметно от источника, что противоречит результатам измерений. Следовательно, преобладающим механизмом распространения облака является конвективная диффузия. В результате экспериментальных исследований для частиц водного аэрозоля с диаметром порядка нескольких микрометров установлено, что величина коэффициента диффузии составляет $D=0,0016$ м²/с, что более чем в ~ 1000000 раз превышает коэффициент броуновской диффузии. Коэффициент диффузии зависит, прежде всего, от размеров частиц, поэтому в расчетах для аэрозоля с той же дисперсностью можно принимать значение коэффициента диффузии, равное $0,0016$ м²/с. Среднюю скорость диффузии можно рассчитать, используя формулу:

$$\bar{u}_b = \frac{12D}{H}, \quad (4)$$

где D – значение коэффициента конвективной диффузии; H – расстояние, пройденное частицей в результате диффузии (в нашем случае $H=1$ м). Значение средней скорости диффузии $u_d=0,0192$ м/с.

Зависимости скорости осаждения от радиуса для модельных веществ, рассчитанные по формуле (2), представлены на рис. 7. В последующих расчетах скоростей диапазон значений размеров частиц соответствует экспериментальным данным, приведенным на рис. 4–6 [12].

Зависимости скоростей диффузии от радиуса для модельных веществ, рассчитанные по формуле (4), представлены на рис. 8.

Следующим механизмом распространения в пространстве диспергируемых частиц является

электрическое поле. Характер распределения аэрозольных частиц под действием электрических полей вдоль осадительного электрода представлен на рис. 9.

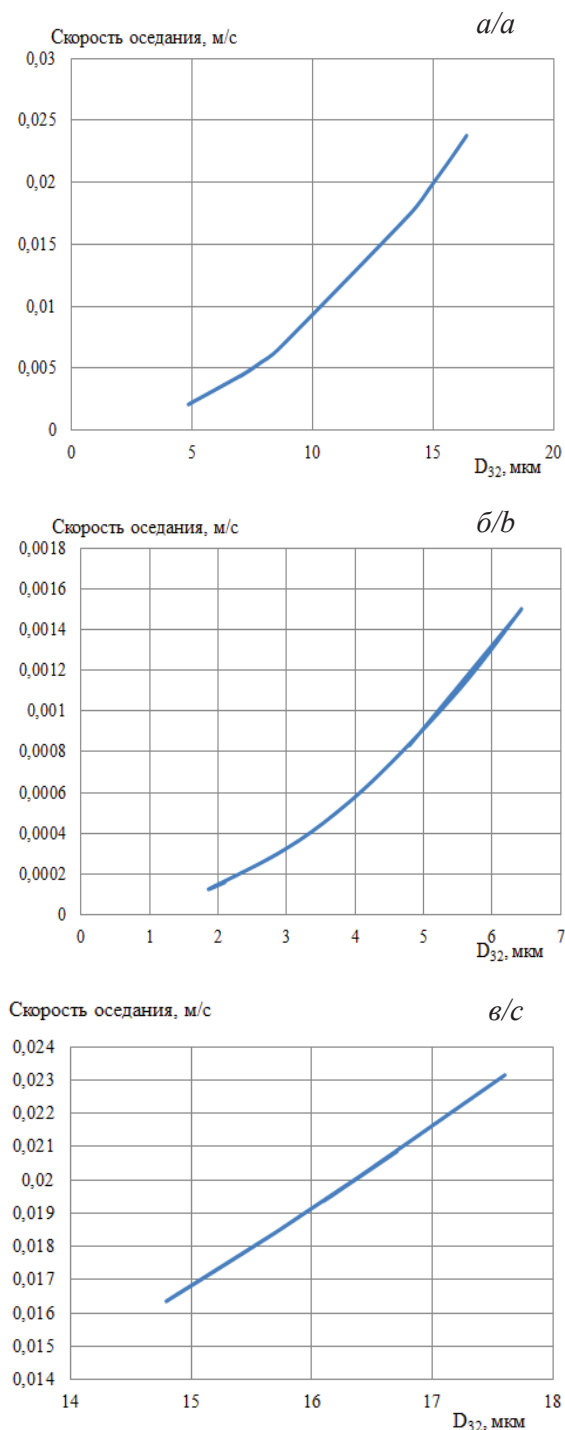


Рис. 7. Зависимость скорости гравитационного осаждения частиц от диаметра частиц распыляемого порошка талька (а), раствора соли (б), аэросила (в)

Fig. 7. Dependence of speed of particle gravitation sedimentation on diameter of particles of pulverizable powder of talk (a), salt solution (b), aerosil (c)

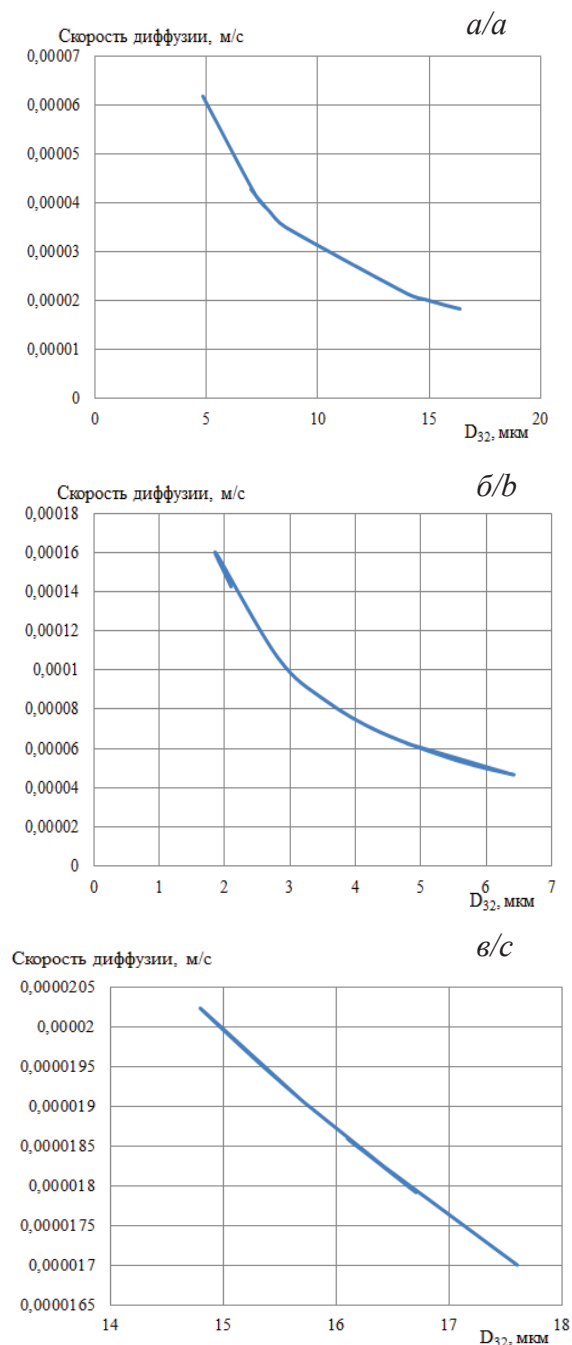


Рис. 8. Зависимость скорости диффузии частиц от диаметра частиц распыляемого порошка талька (а), раствора соли (б), аэросила (в)

Fig. 8. Dependence of particle diffusion rate on diameter of particles of pulverizable powder of talk (a), salt solution (b), aerosil (c)

Как видно из рис. 9, в процессе заряжения отрицательные ионы и свободные электроны при контакте с частицей заряжают её отрицательно, при этом электроны уходят в частицу [15–18].

Перед расчетом скорости дрейфа, с которой частицы, получившие заряд, будут распространяться в измерительном объеме, необходимо учиты-

вать параметры конкретного используемого электрофильтра (таблица).

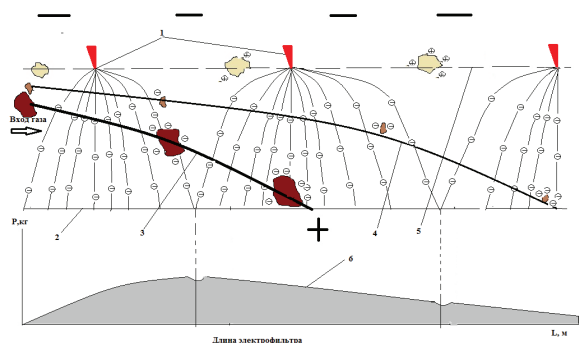


Рис. 9. Упрощенная схема зарядки и осаждения частиц пыли в электрофильтре: 1) коронирующие элементы; 2) осадительный электрод; 3-4) траектория движения крупной (3) и мелкой (4) отрицательно заряженных частиц пыли; 5) траектория положительно заряженной частицы; 6) характер распределения пыли (P , кг) по длине осадительного электрода (L /м)

Fig. 9. Simplified diagram of charge and sedimentation of dust particles in electrical filter: 1) corona elements; 2) precipitation electrode; 3, 4) path of a large (3) and small (4) negatively charged dust particles; 5) path of a positively charged particle; 6) mode of dust distribution (P , kg) over the precipitation electrode length (L /m)

Таблица. Конструктивные параметры электрофильтра, используемого в экспериментах

Table. Design values of the electric filter applied in the experiments

Параметр Parameter	Значение Values
Площадь осаждения S , мм ² Sedimentation area, S , mm ²	1000
Длина коронирующего элемента, длина активной зоны l , м Length of the corona element, active zone length l , m	0,085
Расстояние между коронирующими электродами d , м Distance between the corona electrodes d , m	0,01
Расстояние между плоскостями осадительных и коронирующих электродов H , м Distance between the planes of precipitation and corona electrodes, H , m	0,005
Динамическая вязкость воздуха μ , *10 ⁻⁶ Па*с Dynamic air viscosity μ , *10 ⁻⁶ Pa*s	17,2
Средняя длина пути свободного пробега молекулы, для газов λ , м Average length of a molecule free path, for gases λ , m	10 ⁻⁷
Напряжение (среднее значение) U , В Voltage (average value) U , V	8000
Радиус коронирующего электрода R_1 , м Corona electrode radius R_1 , m	0,004

Одним из расчетных параметров является критическое напряжение, которое можно определить, предварительно рассчитав критическую напряженность E_0 по формуле (1), используя выражение [5]:

$$U_0 = E_0 R_1 \left(\frac{\pi H_1}{d} - \ln \frac{2\pi R_1}{d} \right),$$

где H_1 – расстояние между осадительным и коронирующим электродом; d – расстояние между коронирующими электродами.

Линейная плотность тока короны (мА/м) будет определяться выражением [5]:

$$i_0 = \frac{4\pi^2 k v}{9 \cdot 10^9 d^2 \left(\frac{\pi H}{d} - \ln \frac{2\pi R_1}{d} \right)} U(U - U_0),$$

где v – коэффициент, зависящий от расположения электродов H/d ; U – напряжение (среднее значение); $k=2,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Напряженность электрического поля (В/м) составит:

$$E = \sqrt{\frac{8i_0 H}{4\pi \epsilon_0 k d}},$$

где ϵ_0 – диэлектрическая постоянная распыляемого вещества.

Тогда скорость дрейфа частиц диаметром от 2 до 50 мкм определяется по формуле:

$$\omega = \frac{0,118 \cdot 10^{-10} E^2}{\mu_g} r. \quad (5)$$

А для частиц диаметром от 0,1 до 2 мкм – по формуле:

$$\omega = \omega + \left(1 + A \frac{\lambda}{r} \right), \quad (6)$$

где $A = 0,815 \dots 1,63$; λ – средняя длина свободного пробега молекулы для газов $\lambda=10^{-7}$ [5, 19].

На рис. 10 представлены зависимости рассчитанной по формулам (5), (6) скорости дрейфа от размера частиц D_{32} .

Из рис. 11–13 видно, что наибольшие значения имеет скорость дрейфа для талька (0,04–0,12 м/с) и для раствора соли (0,02–0,07 м/с), а скорость оседания для этих веществ имеет наименьшие значения (менее 0,025 м/с для талька, менее 0,0016 м/с для раствора соли). Для крупных частиц аэросила картина обратная: значительной является скорость оседания (от 0,015 до 0,025 м/с), а наименьшие значения имеет скорость дрейфа (0,005 м/с). Следовательно, эффективным является использование электрофильтра для частиц с диаметром менее 15 мкм (порошок талька и раствора соли), а аэросил быстрее оседает под действием гравитации, чем при воздействии электрического поля [20].

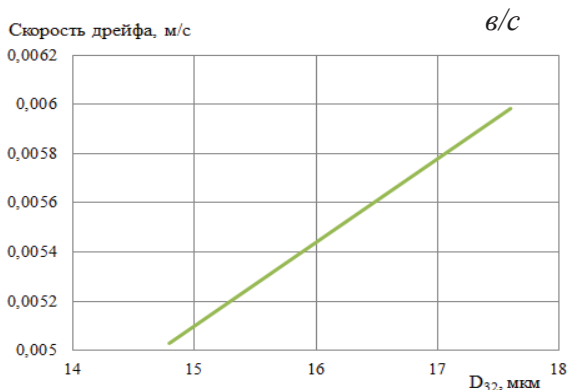
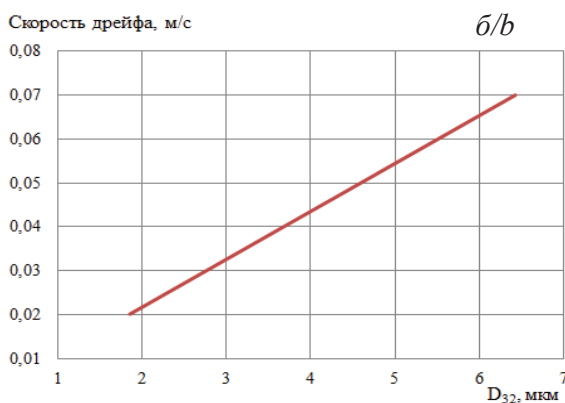
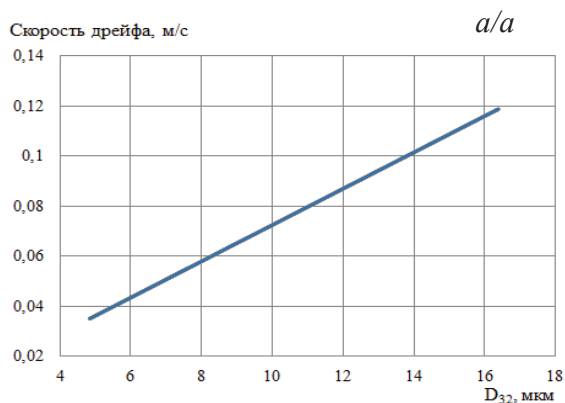


Рис. 10. Зависимость рассчитанной скорости дрейфа частиц от диаметра D_{32} для порошка талька (а), раствора соли (б), аэросила (в)

Fig. 10. Dependence of the calculated particle drift velocity on diameter D_{32} for the powder of talk (a), salt solution (b), aerosil (c)

На следующих рисунках совмещены рассчитанные скорости гравитационного оседания, диффузии, дрейфа для частиц порошка талька (рис. 11), аэросила (рис. 12) и раствора соли (рис. 13).

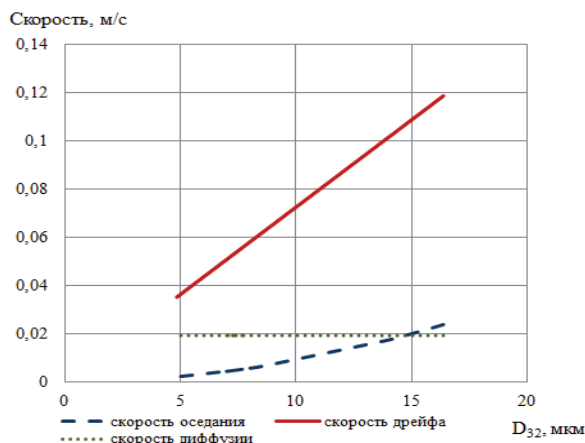


Рис. 11. Зависимость скоростей движения частиц от диаметра D_{32} для порошка талька

Fig. 11. Dependence of particle motion velocity on diameter D_{32} for talk powder

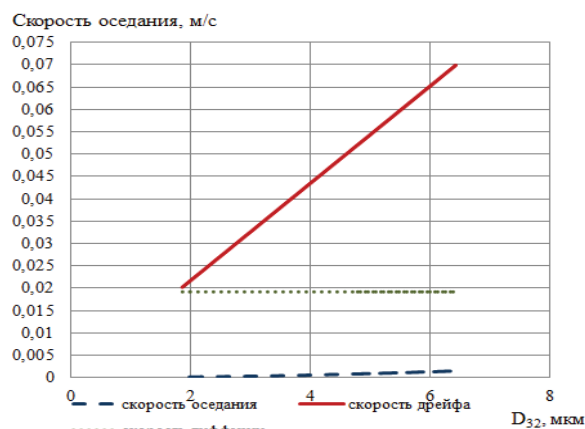


Рис. 12. Зависимость скоростей движения частиц от диаметра D_{32} для раствора соли

Fig. 12. Dependence of particle motion velocity on diameter D_{32} for salt solution

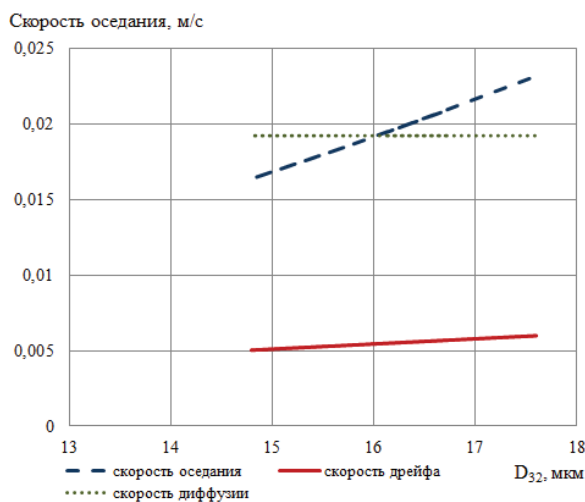


Рис. 13. Зависимость скоростей движения частиц от диаметра D_{32} для аэросила

Fig. 13. Dependence of particle motion velocity on diameter D_{32} for aerosil

Заключение

В статье рассмотрены основные принципы зарядки аэрозольных частиц под действием электрического поля; установлено, что большинство аэрозольных частиц получают отрицательный электрический заряд в поле коронного разряда. Коронный разряд характеризуется значением критической напряженности, которая в свою очередь зависит от параметров используемого электрофильтра и относительной плотности газов.

Для проведения экспериментальных исследований использовалась лазерная измерительная установка на основе метода малоуглового рассеяния, позволяющая фиксировать динамику изменения аэрозольного облака по дисперсности и концентрации в объеме измерительной камеры. С помощью этой установки получены данные эксперимента, позволяющие оценить дисперсионный состав и убыль массовой концентрации в ходе опыта для модельных веществ: насыщенного водного раствора соли, порошка талька и аэросила. Определено, что влияние электрического поля значительно увеличивает время, при котором массовая концентрация аэрозольного облака в измерительном объеме стремится к нулю, для частиц соли и талька (рис. 4, 6). Напротив, воздействие электрического поля на частицы аэросил с диаметром боль-

ше 15 мкм заставляет частицы дольше парить в воздухе, в то время как при гравитационной седиментации аэросил осел уже на 1000 с (рис. 5).

Для тех же модельных веществ был проведен расчет скоростей гравитационного оседания, диффузионного распространения и скорости дрейфа под действием электрического поля. При расчете скорости дрейфа необходимо учитывать параметры используемого в эксперименте электрофильтра (таблица). Как видно из полученных графиков (рис. 11–13), ведущим механизмом осаждения для частиц талька и раствора соли является скорость дрейфа частиц под действием электрического поля, а для более крупных частиц аэросила гравитационная и диффузионная скорость оказались выше, чем скорость дрейфа при воздействии электрофильтра (рис. 13). Данный вывод полностью подтвержден проведенными экспериментами (рис. 4–6). Таким образом, предложенная математическая модель процесса является адекватной, и расчеты на ее основе позволяют заранее определить эффективность использования электрофильтра для осаждения выбранного аэрозоля. Это дает возможность существенно упростить выбор параметров электрофильтра при планировании его использования для улавливания веществ в производственных целях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Modeling and Validation of Nanoparticle Charging Efficiency of a Single-Wire Corona Unipolar Charger / Chih-Liang Chien, Chuen-Jinn Tsai, Hui-Lin Chen, Guan-Yu Lin, Jong-Shinn Wu // *Aerosol Science and Technology*. – 2011. – № 45. – P. 1468–1479.
2. Penetration of Monodisperse, Singly Charged Nanoparticles through Polydisperse Fibrous Filters / A. Podgorski, A. Maiber, W.W. Szymanski, A. Jackiewicz, L. Gradon // *Aerosol Science and Technology*. – 2011. – № 45. – P. 215–233.
3. Санаев Ю.И. Обеспыливание газов электрофильтрами. – Семипалатинск: Кондор-Эко, 2009. – 163 с.
4. Уайт П. Высокоэффективная очистка воздуха. – М.: АТОМИЗДАТ, 1967. – 311 с.
5. Ужов В.Н. Очистка промышленных газов электрофильтрами. – М.: Химия, 1967. – 344 с.
6. Архипов В.А. Аэрозольные системы и их влияние на жизнедеятельность. – Томск: ГТПУ, 2007. – 136 с.
7. Ахмадеев И.Р. Метод и быстродействующая лазерная установка для исследования генезиса техногенного аэрозоля по рассеянию луча в контролируемом объеме: дис. ... канд. техн. наук. – Барнаул, 2008. – 98 с.
8. Remote optical diagnostics of nonstationary aerosol media in a wide range of particle sizes / O. Kudryashova, A. Pavlenko, B. Vorozhtsov, S. Titov, V. Arkhipov, S. Bondarchuk, E. Maksimenko, I. Akhmadeev, E. Muravlev // *Photodetectors*. – 2012. – № 15. – P. 341–364.
9. A method for measurement of disperse composition and concentration of aerosol particles / O.B. Kudryashova, I.R. Akhmadeev, A.A. Pavlenko, V.A. Arkhipov, S.S. Bondarchuk // *Proceedings of ISMTP-2009*. – Saint-Petersburg, Russia, 2009. – P. 178–183.
10. 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.
11. Степкина М.Ю., Кудряшова О.Б. Экспериментальные исследования воздействия электрического поля на микро- и наночас-

- тицы аэрозоля // *NEMs-2014: Тезисы X Междунар. конф.* – Бийск, 2014. – С. 169.
12. Степкина М.Ю. Исследование влияния физических свойств распыляемого вещества на динамику седиментации и электростатического осаждения частиц продуцируемого аэрозоля с учетом его дисперсности // *Аэрозоли Сибири: Сб. тезисов докладов XX Рабочей группы*. – Томск, 2013. – С. 109.
13. Бернев С.А. Физика атмосферных аэрозолей. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2008. – 227 с.
14. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. – М.: Академия наук СССР, 1955. – 353 с.
15. Panich Intra, Artit Yawootti, Nakorn Tippayawong. Evaluation of a unipolar diffusion and field charger of aerosol particles by a corona discharge // *Particulate Science and Technology*. – 2013. – № 47. – P. 621–631.
16. Chaolong Qi, Pramod Kulkarni. Miniature dual-corona ionizer for bipolar charging of aerosol // *Aerosol Science and Technology*. – 2013. – № 47. – P. 81–92.
17. Deposition of charged aerosol particles on a substrate by collimating through an electric field assisted coaxial flow nozzle / Jaehong Park, Jimin Jeong, Chul Kim, Junggho Hwang // *Aerosol Science and Technology* – 2013. – № 47. – P. 512–519.
18. Review of spark discharge generators for production of nanoparticle aerosols / B.O. Meuller, M.E. Messing, D.L.J. Engberg, A.M. Jansson, L.I.M. Johansson, S.M. Norlen, N. Tureson, K. Deppert // *Aerosol Science and Technology*. – 2012. – № 46. – P. 1256–1270.
19. Островский Г.М. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Ч. II. – СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2006. – 916 с.
20. Моделирование процессов осаждения конденсируемой фазы под действием электрического поля / М.Ю. Степкина, О.Б. Кудряшова, Н.В. Коровина, Е.В. Муравлев // *Аэрозоли Сибири: Сб. тезисов докладов XXI Рабочей группы*. – Томск, 2014. – С. 30.

Поступила 16.02.2015 г.

UDC 53.072.621.317.329:53.097:538.9:51–74

CONTROL OF CONDENSED PHASE SEDIMENTATION USING THE ELECTRIC FIELD

Mariya Yu. Stepkina,

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

Olga B. Kudryashova,

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

Relevance of the work is related to the research of efficiency of using electric field for sedimentation of concrete substances to clean the room of aerosol pollution. Development of methods of ensuring purity of the environment and surface in closed working rooms, especially in the conditions of the developing production technologies, medicine and conditions of a person life support, are always actual and timely.

The aim of the research is pilot and theoretical study of sedimentation at electric field interaction with particles of fine aerosols; based on the research to develop the effective ways of collecting various harmful substances from air and cleaning working room surface.

Research methods: the optical diagnostics of an aerosol based on a method of low-angle dispersion with use of the laser measuring LID-2M complex and technology of laser diffraction (Malvern Spraytec analyzer); the tensometric method of weight measurement; the ejector dispersion method; the method of mechanical crushing of the dispersed powders.

Results. The paper demonstrates the charge of aerosol particles at crown category. The authors have carried out the pilot studies of the model substances dispersion affected by the electric field and without it. The values of change in dispersion and mass concentration of the produced aerosol were obtained during the experiment by means of the laser LID-2M measuring machine. It was experimentally determined that the speed of aerosol particles sedimentation affected by the electric field increases several times, but not for all studied substances, large particles of aero force will quicker settle under gravitation. The authors calculated the characteristic speeds arising in the course of aerosol evolution for model substances. The paper introduces the comparative analysis of speeds of particle convective distribution in space, gravitational sedimentation and drift of aerosol cloud particles under electric forces. Based on the analysis it is possible to establish the effectiveness of using the electric field for sedimentation of concrete substance with certain dispersion. The data obtained should be considered as well when designing new installations of electric precipitators.

Key words:

Aerosol cloud, condensed phase, crown category, gravitational sedimentation, speed of particle drift, diffusion coefficient, electrostatic field.

REFERENCES

- Chih-Liang Chien, Chuen-Jinn Tsai, Hui-Lin Chen, Guan-Yu Lin, Jong-Shinn Wu. Modeling and Validation of Nanoparticle Charging Efficiency of a Single-Wire Corona Unipolar Charger. *Aerosol Science and Technology*, 2011, no. 45. pp. 1468–1479.
- Podgorski A., Malber A., Szymanski W.W., Jackiewicz A., Graddon L. Penetration of Monodisperse, Singly Charged Nanoparticles through Polydisperse Fibrous Filters. *Aerosol Science and Technology*, 2011, no. 45. pp. 215–233.
- Sanaev Yu.I. *Obespylivanie gazov elektrofiltrami* [Dust removal of gases with electric precipitators]. Semibratovo, Kondor-Eko Publ., 2009. 163 p.
- White P. *Vysokoeffektivnaya ochestka vozdukha* [Highly effective air purification]. Moscow, ATOMIZDAT Publ., 1967, 311 p.
- Uzhov V.N. *Ochestka promyshlennykh gazov elektrofiltrami* [Purification of industrial gases with electric precipitators]. Moscow, Khimiya Publ., 1967, 344 p.
- Arkipov V.A. *Aerosolnye sistemy i ikh vliyanie na zhiznideyatelnost* [Aerosol systems and their influence on activity]. Tomsk, TGPU Press, 2007. 136 p.
- Akhmadeev I.R. *Metod i bystrodeystvuyushchaya lazernaya ustanovka dlya issledovaniya genezisa tekhnogennogo aerosolya po rasseyaniyu lucha v kontroliruemom obeme*. Dis. Kand. nauk [Method and the high-speed laser machine for researching the genesis of a technogenic aerosol on a beam dispersion in controlled volume. Cand. Diss.] Barnaul, 2008, 98 p.
- Kudryashova O., Pavlenko A., Vorozhtsov B., Titov S., Arkipov V., Bondarchuk S., Maksimenko E., Akhmadeev I., Mura-
- vlev E. Remote optical diagnostics of nonstationary aerosol media in a wide range of particle sizes. *Photodetectors*, 2012, no. 15, pp. 341–364.
- Kudryashova O.B., Akhmadeev I.R., Pavlenko A.A., Arkipov V.A., Bondarchuk S.S. A method for measurement of disperse composition and concentration of aerosol particles. *Proceedings of ISMTII-2009*. Saint-Petersburg, Russia, 2009. pp. 178–183.
- Stepkina M.Yu., Akhmadeev I.R., Vorozhtsov B.I. Experimentalnoe issledovanie sposoba uskoreniya osazhdeniya melkodispersnogo aerosolnogo oblaka pod deystviem elektricheskogo polya [Pilot study of a way of acceleration of fine aerosol cloud sedimentation under the influence of electric field]. *Polzunovskiy Vestnik*, 2014, no. 3, pp. 134–138.
- Stepkina M.Yu., Kudryashova O.B. Experimentalnye issledovaniya vozdeystviya elektricheskogo polya na micro- i nanochastitsy aerosolya [Pilot studies of electric field influence on aerosol micro- and nanoparticles]. *HEMs-2014. Vysokoenergeticheskie materialy: demilitarizatsiya, antiterrorizm i grazhdanskoe primeneniye* [High-energy materials: demilitarization, anti-terrorism and civil application]. Biysk, 2014. pp. 169.
- Stepkina M.Yu. Issledovaniya vliyaniya fizicheskikh svoystv raspylaemogo veshchestva na dinamiku sedimentatsii i elektrostaticheskogo osazhdeniya chastitsy produksirovannogo aerosolya s uchetom ego dispersnosti [Research of influence of the sprayed substance physical properties on dynamics of sedimentation and electrostatic sedimentation of particles of the produced aerosol taking into account its dispersion]. *Aerosoli Sibiri. Proc.* [Aerosols of Siberia]. Tomsk, 2013. pp. 109.

13. Bersnev S.A. *Fizika atmosferykh aerorozley* [Physics of atmospheric aerosols]. Ekaterinburg, Ural University Press, 2008. 227 p.
14. Fuks N.A. *Mekhanika aerosoley* [Mechanics of aerosols]. Moscow, USSR Academy of sciences Press, 1955. 353 p.
15. Panich Intra, Artit Yawootti, Nakorn Tippayawong. Evaluation of a unipolar diffusion and field charger of aerosol particles by a corona discharge. *Particulate Science and Technology*, 2013, no. 47, pp. 621–631.
16. Chaolong Qi, Pramod Kulkarni. Miniature dual-corona ionizer for bipolar charging of aerosol. *Aerosol Science and Technology*, 2013, no. 47, pp. 81–92.
17. Jaehong Park, Jimin Jeong, Chul Kim, Jungho Hwang. Deposition of charged aerosol particles on a substrate by collimating through an electric field assisted coaxial flow nozzle. *Aerosol Science and Technology*, 2013, no. 47, pp. 512–519.
18. Mueller B.O., Messing M.E., Engberg D.L.J., Jansson A.M., Johansson L.I.M., Norlen S.M., Tureson N., Deppert K. Review of spark discharge generators for production of nanoparticle aerosols. *Aerosol Science and Technology*, 2012, no. 46, pp. 1256–1270.
19. Ostrovskiy G.M. *Novy spravochnik khimika i tekhnologa. Protsesty i apparaty khimicheskikh tekhnologiy* [New reference book of the chemist and technologist. Processes and devices of chemical technologies]. Saint-Petersburg, Professional Publ., 2006. P. II, 916 p.
20. Stepkina M.Yu., Kudryashova O.B., Korovina N.V., Myravlev E.V. Modelirovanie protsessov osazhdeniya kondensiruemoy fazy pod deystviem elektricheskogo polya [Modeling of the condensed phase sedimentation under the influence of electric field]. *Proc. of the XXI working group. Aerorozli Sibiri* [Aerosols of Siberia]. Tomsk, 2014. p. 30.

Received: 16 February 2015.