

DOI: 10.15593/2224-9877/2016.2.13

УДК 613.633:62-78:519.652

**К.А. Черный**Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ «АЭРОЗОЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ – АЭРОИОНЫ» ВОЗДУХА РАБОЧЕЙ ЗОНЫ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

На современном машиностроительном производстве аэрозольное загрязнение воздуха рабочей зоны частицами диаметром менее 0,1 мкм становится преобладающим. Такое высокодисперсное загрязнение обусловлено применением новых технологий осуществления производственных операций (например, новых видов сварки и резки металлов). Кроме того, высокодисперсное загрязнение вызвано всё более возрастающими скоростями, сложностью и точностью обработки материалов, а также всё более широким внедрением на различных производствах пластмассовых, полимерных и композитных материалов и обрабатываемых деталей из высокопрочных сплавов, в том числе полученных при помощи нанотехнологий.

Изучение высокодисперсных аэрозольных частиц является технически сложной задачей, и полный мониторинг дисперсного состава аэрозольных загрязнений зачастую является невыполнимым или достаточно трудоемким. Следовательно, актуальным становится поиск новых способов оценки аэрозольного загрязнения в широком интервале размеров частиц.

Отмеченная в ряде исследований стабильность дисперсного состава аэрозолей позволила разработать ряд математических моделей распределения аэрозольных частиц по размерам. Однако для определения параметров известных к настоящему моменту моделей дисперсного распределения частиц зачастую требуется проведение дополнительных, не менее трудоемких исследований.

Между тем загрязнение высокодисперсными аэрозольными частицами воздуха оказывает влияние на известный параметр воздуха рабочей зоны – аэроионный состав. При осуществлении ряда производственных операций происходит модификация аэроионного состава, заключающаяся в изменении (в основном уменьшении) концентрации легких аэроионов при увеличении аэрозольного загрязнения, в особенности частицами высокодисперсной фракции. В статье представлена модель взаимосвязи распределения высокодисперсных аэрозольных частиц с концентрацией аэроионов воздуха рабочей зоны. На основе полученных решений разработан алгоритм моделирования распределения аэрозольных частиц по размерам и метод оценки высокодисперсной фракции аэрозольного загрязнения с учетом параметров аэроионного состава.

Предложенный подход апробирован на примере широко распространенной производственной операции – шлифовки изделий из различных материалов. Распределение частиц при обработке деталей из стали описывается двумя модами, в случаях обработки деталей из алюминия, керамики и тефлона – тремя модами. Наибольшим высокодисперсным загрязнением характеризуется шлифовка деталей из алюминия. При обработке деталей из керамики наблюдается максимальная (по сравнению с другими исследуемыми материалами) концентрация аэрозольных частиц респираторной фракции (диаметром более 0,5 мкм). При обработке деталей из керамики и тефлона в области высокодисперсных (менее 0,1 мкм) частиц распределение удалось свести к одной моде. Оценка характерных величин интенсивности ионообразования для производственных помещений без дополнительных источников генерации аэроионов подтверждает достоверность представленной модели «аэрозольные частицы – аэроионы» и положенного в ее основу теоретико-эмпирического аппарата.

**Ключевые слова:** воздух рабочей зоны, распределение частиц по размерам, высокодисперсный аэрозоль, логнормальное распределение, экстраполяция, диффузионная зарядка частиц, тяжелые аэроионы, легкие аэроионы, электрическая подвижность, шлифовка.

**K.A. Chernyi**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **SIMULATION OF “AEROSOL PARTICLES – AIR IONS” SYSTEM IN WORKING AREA APPLIED TO ENGINEERING PRODUCTION**

The aerosol particles with a diameter less than  $0.1 \mu\text{m}$  become prevalent in air pollution of working area of modern engineering production. Such ultrafine aerosol pollutions are caused by the use of new technologies of the engineering operations (for example, new types of welding and metal cutting). In addition the emissions of ultrafine aerosol are caused by more increased speed, complexity and precision of material processing as well as the more extensive usage a plastic, polymer or composite materials and workpieces of high-strength alloys, including those obtained by using nanotechnology.

Because investigation of fine aerosol particles is technically challenging process the full monitoring of aerosol particle distribution is often impossible or time-consuming. Therefore the study for new ways to estimation of wide range size of aerosol particle is of current interest.

The studies of the stability of particulate composition of aerosols have allowed developing a series of mathematical models for aerosol particle size distribution. However for all of known models the additional and complex researches to determine the parameters of aerosol particle size distribution are often required.

Meanwhile fine aerosol particle contamination is interconnected and influences on the known air parameter of the working area – the air ion composition. Under influence of manufacturing operations air ion composition is modified and the concentration changes of small air ion (mostly decreasing) are determined by aerosol size distribution especially ultrafine particulate fraction. In the article a model of interrelation between fine aerosol particles distribution and air ion concentration of working area is presented. On the basis of this model and proposed method of ultrafine aerosol fraction assessment taking into account the parameters of air ion composition the algorithm for aerosol particle size distribution modeling is designed.

On the example of the widespread industrial operations of engineering companies – grinding products from different materials – the proposed approach has been tested. The aerosol distributions in processing of parts made of steel are described by two size modes, same in cases machining of aluminum, ceramic and Teflon – by three size modes. Finely grinding of aluminum parts is characterized by greatest aerosol pollution. Under treatment of parts from ceramics the maximum concentration of respirable fraction of the aerosol particles (particle diameter more  $0.5 \mu\text{m}$ ) compared with all test materials is observed. In the treatment of parts from ceramic and Teflon the distribution in the area of fine (less than  $0.1 \mu\text{m}$ ) particles was reduced to a single size mode.

Evaluation of ion generation intensity and comparability with intensity on industrial workplace without additional sources of generation of air ions are confirmed the authenticities of the presented model “aerosol particles – air ions” and of its theoretical and empirical basis.

**Keywords:** air of the working area, aerosol particles distribution, ultrafine aerosol, log-normal distribution, extrapolation, diffusing particles charge, large air ions, small air ions, electrical mobility, grinding.

### **Введение**

Во многих отраслях современного машиностроительного производства из-за увеличения числа и интенсивности технологических процессов, в ходе которых образуется и выделяется большое количество аэрозольных загрязнителей, наблюдается неблагоприятное воздействие на воздух рабочей зоны [1–3].

Несмотря на то что значимость аэрозольного загрязнения воздуха рабочей зоны признана уже давно, до настоящего времени не все фун-

даментальные закономерности аэрозольного загрязнения в реальных производственных условиях установлены и описаны. Наиболее изученными являются аэрозольные частицы с размером, превышающим 0,5–1 мкм, в силу возможности отбора их на фильтры для последующего микроскопического и химического анализа. Однако принятый в настоящее время гравиметрический подход к способу оценки вредного воздействия аэрозольного загрязнения не удовлетворяет современным тенденциям, поскольку без определения дисперсности аэрозольных частиц, их физико-химических и технологических свойств нельзя объективно оценить эффективность, подобрать, наладить и правильно эксплуатировать устройства индивидуальной и коллективной защиты [4–6].

На современном этапе развития машиностроительного производства актуальность проблемы обеспечения безопасности и качества воздуха рабочей зоны усугубляется увеличением выбросов в воздух рабочей зоны высокодисперсных аэрозольных частиц (диаметром от порядка нанометра до, по крайней мере, сотен нанометров), в том числе и электрически заряженных (тяжелых аэроионов) [7–14]. Увеличение доли высокодисперсных частиц связано с технологическим и техническим перевооружением, а именно с всевозрастающими скоростями, сложностью и точностью обработки материалов, с всё более широким внедрением на различных производствах пластмассовых, полимерных и композитных материалов и обрабатываемых деталей из высокопрочных сплавов, в том числе полученных при помощи нанотехнологий.

Другой, не менее важной характеристикой рабочей зоны является аэроионный состав, который определяет качество воздуха в технологической зоне машиностроительного производства и активно влияет на износ оборудования [15, 16].

Таким образом, с учетом изменения характера и условий труда современного машиностроительного производства необходимо рассматривать высокодисперсное аэрозольное загрязнение и аэроионный состав как взаимосвязанные производственные факторы, определяющие безопасность и качество воздуха рабочей зоны.

Однако следует отметить, что измерение концентраций аэрозольных частиц диаметром менее 0,1 мкм является задачей технически очень сложной [17]. В связи с этим актуальным становится получение информации о высокодисперсных аэрозольных частицах путем экстра-

поляции инструментально определенного распределения частиц размером более 0,1 мкм в более мелкие фракции. Для этого предлагается осуществить моделирование взвешенных в воздухе частиц диаметром от порядка нанометра до, по крайней мере, сотен нанометров, рассматривая систему «аэрозольные частицы – аэроионы».

### **Теоретико-эмпирические основы модели**

Картину взаимосвязи концентрации легких аэроионов с аэрозольным загрязнением предлагается проследить, рассматривая ионизационно-рекомбинационное уравнение образования и исчезновения легких аэроионов, устанавливающее взаимосвязь величины объемных счетных концентраций легких аэроионов с уровнем ионообразования и аэрозольным загрязнением с учетом рекомбинации аэроионов между собой и осаждения на аэрозольные частицы:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = v - \alpha n_+ n_- - n_i \sum_{\chi=-\infty}^{\chi=+\infty} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} dD \beta_{\chi}^i(D) N(\chi, D, t), \quad (1)$$

где  $n_i$  – концентрация легких аэроионов подвижностью  $\mu_i = 0,5 \dots 2 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $i$  – характеристика заряда иона: если заряд положительный, то  $i$  обозначается знаком «+», если заряд отрицательный – знаком «-»;  $v$  – интенсивность ионообразования;  $\alpha$  – коэффициент рекомбинации противоположно заряженных легких аэроионов друг с другом, согласно расчетам по теории прилипания в результате тройного столкновения для нормальных условий  $\alpha = 1,4 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$ , что близко к экспериментально наблюдаемым значениям  $\alpha \cong 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$  [18];  $\beta_{\chi}^i(D)$  – коэффициент слияния легких положительных (или отрицательных) аэроионов и аэрозольных частиц диаметром  $D$  и зарядом  $\chi e$  (или  $-\chi e$ );  $N(\chi, D, t)$  – концентрация аэрозольных частиц диаметром  $D$  и зарядом  $\chi e$  в момент времени  $t$ ;  $e$  – элементарный заряд;  $t$  – время.

Предположим, что система «аэрозольные частицы – аэроионы» находится в термодинамическом и электрическом равновесии (т.е. распределение аэрозольных частиц по размерам квазистационарно и по зарядам симметрично). Тогда уравнение (1) может быть записано в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_+}{\partial t} &= v - \alpha n_+ n_- - S_p^+ n_+, \\ \frac{\partial n_-}{\partial t} &= v - \alpha n_- n_+ - S_p^- n_-, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $S_p^i$  – коэффициент, отражающий величину убыли аэроионов на аэрозольных частицах,  $S_p^i = \sum_{\chi=-\infty}^{\chi=+\infty} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} dD \beta_{\chi}^i(D) N(\chi, D)$ .

В равновесном состоянии производные уравнений (2) становятся равными нулю и  $S_p^+ n_+ = S_p^- n_-$ . Решение уравнений (2) относительно  $n_+$  и  $n_-$  дает

$$\begin{aligned} n_+ &= \frac{\sqrt{\left(S_p^-\right)^2 + 4 \frac{S_p^-}{S_p^+} \alpha v} - S_p^-}{2\alpha}, \\ n_- &= \frac{\sqrt{\left(S_p^+\right)^2 + 4 \frac{S_p^+}{S_p^-} \alpha v} - S_p^+}{2\alpha}. \end{aligned} \quad (3)$$

Предположив, что концентрации легких аэроионов обоих знаков равны ( $n_+ = n_- = n$ ), исходные уравнения аэроионного баланса (2), опуская индекс  $i$ , запишем в виде

$$\frac{\partial n}{\partial t} = v - \alpha n^2 - S_p n. \quad (4)$$

Убыль аэроионов  $S_p n$  в уравнении ионного баланса за счет оседания на аэрозольные частицы в предположении, что полное число аэрозольных частиц в единице объема  $N = N_0(D) + 2 \sum_{\chi=1}^{\infty} N_{\chi}(D)$  и  $N_+ = N_-$ ,

можно записать как

$$S_p n = n \sum_{\chi=-\infty}^{\chi=+\infty} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} dD \beta_{\chi}(D) N(\chi, D) =$$

$$= n \sum_{D=D_{\min}}^{D=D_{\max}} \left( \beta_0(D)N_0(D) + \sum_{\chi=-\infty}^{\chi=+\infty} N_{\chi}(D)\beta_{\chi}(D) \right), \quad (5)$$

где  $\beta_0(D)$  – коэффициент рекомбинации между аэроионами и нейтральными аэрозольными частицами;  $\beta_{\chi}(D)$  – коэффициент рекомбинации между аэроионами и заряженными частицами с числом элементарных зарядов  $\chi = 1, 2, 3, \dots$  (или  $-\chi = 1, 2, 3, \dots$ );  $N_0(D)$  – концентрация незаряженных частиц;  $N_{\chi}(D)$  – концентрация частиц, заряженных до величины  $\chi$  (или  $-\chi$ ).

В равновесном состоянии системы применительно к условию симметричной (т.е. при  $n_+ = n_-$ ) диффузионной зарядки аэрозольных частиц легкими аэроионами слияние аэроионов и аэрозольных частиц (5) во всем интервале размеров частиц может быть описано эмпирической формулой [19]

$$S_p n \approx n \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) \left[ 25 \sqrt{\frac{D - 0,001}{D + 0,005}} \cdot D \cdot 10^{-6} \right] dD, \quad (6)$$

где  $D$  – диаметр аэрозольных частиц, мкм;  $N(D)$  – распределение аэрозольных частиц по размерам.

С учетом принятых обозначений для стационарных условий уравнение (4) принимает вид

$$v = \alpha n^2 + S_p n. \quad (7)$$

Решая полученное квадратное уравнение и исключая отрицательное решение, имеем

$$n = \frac{\sqrt{S_p^2 + 4\alpha v} - S_p}{2\alpha}. \quad (8)$$

### **Модель системы «аэрозольные частицы – аэроионы», алгоритм моделирования распределения аэрозольных частиц по размерам**

Отметим, что для решения уравнения (8), связывающего интенсивность ионообразования, счетные концентрации легких аэроионов и распределение аэрозольных частиц по размерам, необходимы сведе-

ния о дисперсном составе аэрозоля в широком интервале размеров частиц от  $D_{\min}$  (по крайней мере порядка 0,05 мкм) до  $D_{\max}$ .

В практических исследованиях чаще всего распределение определено только для аэрозольных частиц диаметром порядка и более 0,1 мкм (чаще в диапазоне диаметров более 0,3–0,5 мкм). Применение уравнения (8) становится некорректным в случае отсутствия данных распределения аэрозольных частиц в широком интервале от  $D_{\min}$  до  $D_{\max}$ .

Информацию о высокодисперсных аэрозольных частицах, имея данные о распределении частиц размером более 0,1 мкм, можем получить, рассматривая эмпирические модели, описывающие характер распределения частиц аэрозоля по размерам.

Логарифмически нормальное распределение считается наиболее обоснованным для аналитического описания дисперсного состава аэрозольного загрязнения, особенно в области высокодисперсной фракции. Известно [20], что в большинстве случаев распределение аэрозольных частиц может быть сведено к суперпозиции нескольких логарифмически нормальных распределений:

$$\frac{\partial N(D)}{\partial(D)} = \sum_{j=1}^p \frac{N_{0j}}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma_j D} \exp \left( -\frac{(\ln D - \ln D_{0j})^2}{2(\ln \sigma_j)^2} \right), \quad (9)$$

где  $N_{0j}$  – общее число частиц  $j$ -й моды;  $\sigma_j$  – стандартное геометрическое отклонение  $j$ -й моды;  $D_{0j}$  – среднее геометрическое значение диаметра моды.

Число мод  $j$  в распределении примем равным четырем [21], причем одна из мод ( $j = 4$ ) лежит в области частиц со средним геометрическим значением диаметра  $D_{04} > 1$  мкм. В области размеров частиц менее 1 мкм рассматриваются возможные оставшиеся три моды (рис. 1). При этом будем иметь в виду, что в отдельных случаях распределение в области размеров частиц менее 1 мкм может быть сведено к бимодальному или даже одномодальному.

Таким образом, использование суперпозиции нескольких логарифмически нормальных распределений для описания дисперсного состава аэрозольных частиц позволяет проводить аппроксимации экспериментальных данных распределения вплоть до диапазона диаметров  $D \sim 0,01$  мкм и тем самым оценивать количественные характеристики высокодисперсной фракции аэрозоля.

При моделировании распределения аэрозольных частиц предлагается принять следующие начальные условия итераций и пройти следующие итерационные этапы:

*Этап 1.* В первоначальном приближении средние геометрические диаметры частиц, стандартные геометрические отклонения и концентрации частиц принимают значения согласно рис. 1. Значения  $D_{0j}$ ,  $\sigma_j$ ,  $N_{0j}$  подбираются методом наименьших квадратов таким образом, чтобы обеспечить соответствие известным экспериментальным данным распределения аэрозольных частиц, а также сходимость уравнения (5),

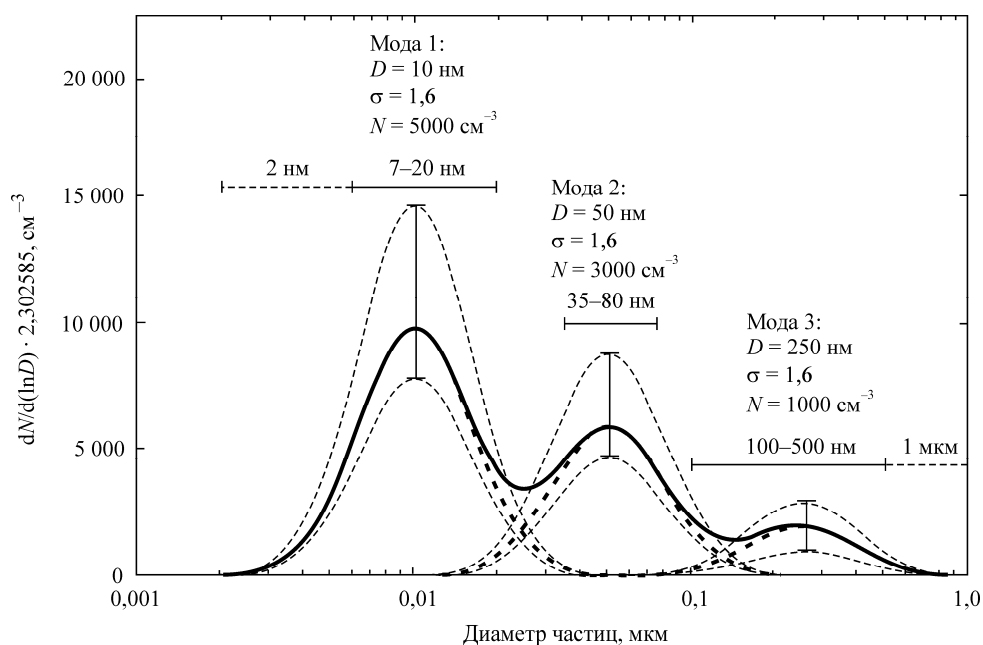


Рис. 1. Первоначальные условия итераций при моделировании распределения аэрозольных частиц (по данным работы [21])

связывающего распределение аэрозольных частиц и концентрации аэроионов. Для этого в модах последовательно подгоняются значения: а) средних геометрических диаметров  $D_{0j}$ ; б) стандартных геометрических отклонений  $\sigma_j$  в диапазоне 1,2–2,1; в) общего числа частиц  $N_{0j}$ .

*Этап 2.* При условии достижения заданной точности аппроксимации рассматривается возможность уменьшения количества мод в диапазоне размеров частиц менее 1 мкм с трех до двух. Возможны



два варианта: в диапазоне размеров частиц менее 0,1 мкм наблюдаются две моды (начальные условия итераций аналогичны моде 1 и моде 2 (см. рис. 1)) или в диапазоне частиц менее 0,1 мкм наблюдается только одна мода (диапазон частиц 0,003–0,100 мкм), а вторая мода попадет в диапазон размеров 0,1–1,0 мкм.

*Этап 3.* При условии достижения заданной точности аппроксимации рассматривается возможность уменьшения количества мод в диапазоне размеров частиц менее 1 мкм с двух до одной. В случае одномодового распределения проводятся итерации, аналогичные описанным на первом этапе для диапазона размеров частиц 0,003–1,000 мкм.

В диапазоне высокодисперсных аэрозольных частиц (диаметром менее 0,1 мкм) следует рассматривать только одну моду, а другую следует отнести к диапазону размеров частиц более 0,1 мкм при выполнении хотя бы одного из представленных ниже условий:

$$\text{а) } \ln\left(\frac{D_{02}}{D_{01}}\right) < 0,53 \text{ и } D_{03} > 0,1 \text{ мкм};$$

$$\text{б) } \ln\left(\frac{D_{02}}{D_{01}}\right) < 0,76 \text{ и } \ln\left(\frac{D_{03}}{D_{02}}\right) < 0,76 \text{ и } D_{03} > 0,1 \text{ мкм};$$

$$\text{в) } \ln\left(\frac{D_{02}}{D_{01}}\right) < 0,76 \text{ и } N_{01} < 0,25(N_{01} + N_{02} + N_{03})$$

или  $N_{02} < 0,25(N_{01} + N_{02} + N_{03})$ ;

$$\text{г) } \ln\left(\frac{D_{02}}{D_{01}}\right) < 1,15 \text{ или } \ln\left(\frac{D_{03}}{D_{02}}\right) < 1,15 \text{ и } N_{02} < 0,25(N_{01} + N_{02} + N_{03}).$$

В диапазоне высокодисперсных аэрозольных частиц (диаметром менее 0,1 мкм) следует рассматривать две моды при выполнении хотя бы одного из представленных ниже условий:

$$\text{а) } D_{03} < 0,09 \text{ мкм};$$

$$\text{б) } N_{03} < 0,03(N_{01} + N_{02} + N_{03}) \text{ и } D_{03} < 0,1 \text{ мкм};$$

$$\text{в) } \ln\left(\frac{D_{02}}{D_{01}}\right) < 0,76 \text{ или } \ln\left(\frac{D_{03}}{D_{02}}\right) < 0,76 \text{ и } D_{03} < 0,1 \text{ мкм};$$

$$r) \ln \left( \frac{D_{03}}{D_{02}} \right) < 0,55.$$

Моду высокодисперсных частиц (мода 2) определяем методом наименьших квадратов таким образом, чтобы значения концентраций тяжелых аэроионов, вычисленные исходя из Больцмановского распределения заряда на аэрозольных частицах

$$\frac{N_x(D)}{N} = \left[ \sqrt{\frac{4\pi^2 \epsilon_0 D k T}{e^2}} \left( 1 + \frac{e^2}{48\pi \epsilon_0 D k T} \right) \right]^{-1} \exp \left( -\frac{\chi^2 e^2}{4\pi \epsilon_0 D k T} \right), \quad (10)$$

а также эмпирического соотношения, связывающего значение диаметра аэрозольных частиц и подвижности [22]

$$\mu = \left( \frac{9,44\chi}{D} \right) \left[ 1 + \frac{165}{D} \left( 1 + 0,336 \exp \left( -\frac{D}{153} \right) \right) \right] 10^{-3}, \quad (11)$$

совпадали с экспериментально наблюдаемыми. В уравнениях (10) и (11) приняты обозначения:  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура.

### **Экспериментальная проверка достоверности модели**

Предложенная модель системы «аэрозольные частицы – аэроионы» апробирована экспериментально в условиях действующего машиностроительного производства. В качестве характерной производственной операции и характерной рабочей зоны выбрана ручная механическая шлифовка деталей и, соответственно, воздух рабочей зоны шлифовщика, выполняющего работу по зачистке деталей при помощи ручной шлифовальной машины, оснащенной шлифовальным кругом из керамического оксида алюминия, скорость его вращения – до 35 000 об/мин. Исследования проведены для обрабатываемых деталей из различных материалов – стали, алюминия, керамики, политетрафторэтилена (тефлона).

Измерение концентраций легких (подвижностью более  $0,1 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ) и тяжелых (подвижностью  $0,001 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ) аэроионов проводилось при помощи спектрометра аэроионов УТ-8401 № 154. Для определения распределения аэрозольных частиц по размерам ис-

пользовался аэрозольный счетчик ПКЗВ-1 с диапазоном размеров исследуемых аэрозольных частиц 0,3–100 мкм.

Все указанные средства измерения располагались на передвижной платформе высотой 1,5 м, которая при проведении исследований находилась на расстоянии не более 0,5 м от зоны дыхания работника (все исследованные операции выполнялись работниками в положении стоя). Перед началом измерений приборы заземляли, готовили к работе, прогревали и устанавливали необходимые настройки. Снятие показаний приборов осуществляли после начала выполнения исследованных производственных операций. Для обеспечения статистической достоверности все исследования выполнялись сериями из не менее 5–7 измерений. Между проведением серий измерений осуществлялись сброс показаний, корректировка или установление «нуля» приборов. Во время измерений не допускалось никаких посторонних движений в исследуемом объеме воздуха рабочей зоны.

При шлифовке распределение аэрозольных частиц носит явно выраженный модальный характер. Распределение частиц при обработке деталей из стали описывается двумя модами (рис. 2, *а*). В случаях обработки деталей из алюминия (рис. 2, *б*), керамики (рис. 2, *в*), тефлона (рис. 2, *г*) – тремя модами. При обработке деталей из керамики и тефлона в области высокодисперсных (менее 0,1 мкм) частиц распределение удалось свести к одной моде (см. рис. 2, *в* и *г*, обозначено мода 1(2)).

Средние геометрические значения диаметров мод распределений варьируются в диапазонах  $D_{02} = (0,034 \pm 0,013)$  мкм,  $D_{03} = (0,61 \pm 0,06)$  мкм,  $D_{04} = (2,33 \pm 0,44)$  мкм. Величины стандартных геометрических отклонений варьируются в диапазонах  $\sigma_{02} = 1,75 \pm 0,13$ ,  $\sigma_{03} = 1,65 \pm 0,15$ ,  $\sigma_{04} = 1,73 \pm 0,18$ . Модальные счетные концентрации  $N_{03}$  и  $N_{04}$  варьируются в очень широких пределах – от единиц до сотен и от долей единиц до единиц соответственно. Модальная счетная концентрация (диапазон высокодисперсных частиц) варьируется в диапазоне  $N_{02} = (48\ 750 \pm 15\ 750)$  см<sup>-3</sup>.

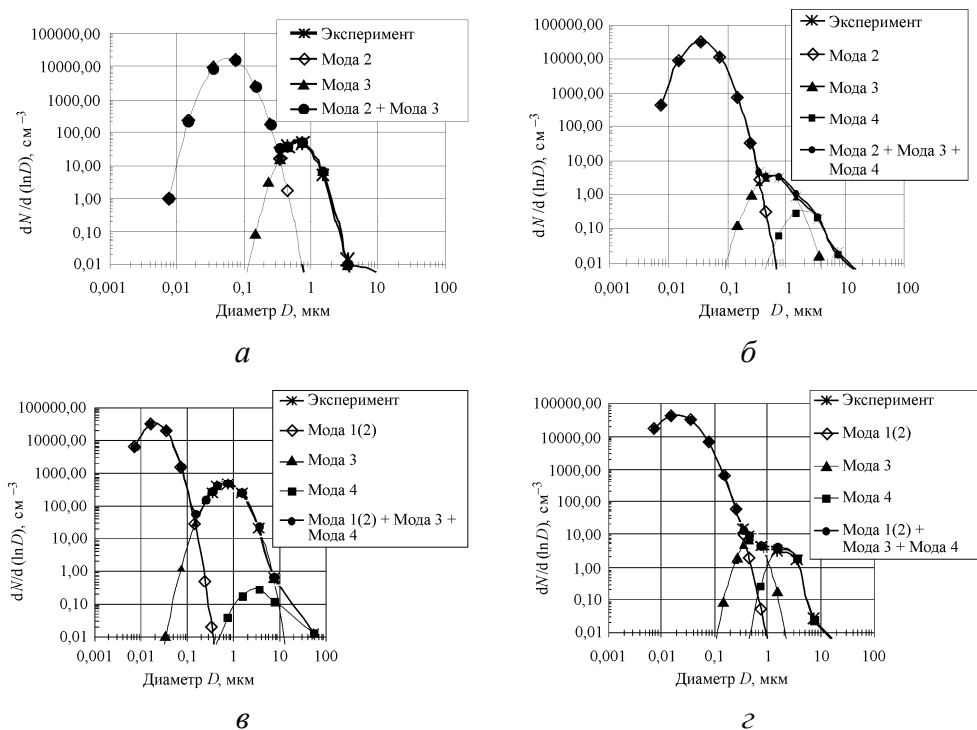


Рис. 2. Аэрозольное загрязнение воздуха рабочей зоны при шлифовке детали: а – из стали; б – алюминия; в – керамики; г – тефлона

Концентрации легких аэроионов при шлифовке составляют величину порядка  $100 \text{ см}^{-3}$ . Оцененная по уравнению (7) величина интенсивности ионообразования варьируется в пределах  $(4,65 \pm 0,15) \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$  и является характерной для производственных помещений без дополнительных источников генерации аэроионов, что подтверждает достоверность представленной модели «аэрозольные частицы – аэроионы» и положенного в ее основу теоретико-эмпирического аппарата.

### Заключение

Предложенная модель системы «аэрозольные частицы – аэроионы» апробирована на одной из характерных для машиностроительных производств операции – холодной механической обработке (шлифовке) деталей из различных материалов (сталь, алюминий, керамика, тефлон). Полученные результаты подтверждают возможность применения предложенного подхода к оценке содержания аэрозолей высоко-

дисперсной фракции (размером менее 0,1 мкм) по результатам исследований аэроионного состава и аэрозольного распределения частиц в области фракций размером более 0,3 мкм. Совпадение результатов оценок с известными в научном сообществе результатами свидетельствует о достоверности предложенного подхода.

Показано, что при осуществлении отдельных из указанных выше производственных операций аэрозольное загрязнение характеризуется наличием аэрозольных частиц высокодисперсной фракции, что накладывает дополнительные требования по обеспечению безопасной и качественной воздушной среды в зоне технологических операций и рабочей зоне. Так, например, при шлифовке наибольшая генерация высокодисперсных частиц наблюдается при обработке деталей из алюминия. При обработке деталей из керамики установлена максимальная (по сравнению с другими исследуемыми материалами) из исследованных материалов концентрация аэрозольных частиц респираторной фракции (диаметром более 0,5 мкм).

### Список литературы

1. Азаров В.Н. Комплексная оценка пылевой обстановки и разработка мер по снижению запыленности воздушной среды промышленных предприятий: дис. ... д-ра техн. наук. – Ростов н/Д, 2003. – 334 с.
2. Тетерева Е.Ю. Совершенствование методов контроля и оценки дисперсного состава пыли в воздухе рабочей зоны и эффективности инженерно-экологических систем: дис. ... канд. техн. наук. – Волгоград, 2010. – 189 с.
3. Минько В.М. Охрана труда в машиностроении. – М.: Академия, 2010. – 256 с.
4. Osunsanya T., Prescott G., Seaton A. Acute respiratory effects of particles: mass or number? // *Occupational and Environmental Medicine*. – 2001. – Vol. 58, iss. 3. – P. 154–159.
5. Глушкова А.В., Радиков А.С., Рембовский В.Р. Нанотехнологии и нанотоксикология – взгляд на проблему // *Токсикологический вестник*. – 2007. – № 26. – С. 42–43.
6. Оценка потенциального загрязнения атмосферного воздуха мелкодисперсными частицами в зоне расположения машиностроительного предприятия / И.В. Май [и др.] // *Вестник Пермского нацио-*

нального исследовательского политехнического университета. Урбанистика. – 2012. – № 2(6). – С. 122–133.

7. Vincent J.H., Clement C.F. Ultrafine particles in workplace atmospheres // *Philosophical Transactions of the Royal Society. A: Mathematical Physical and Engineering Sciences.* – 2000. – Vol. 358(1775). – P. 2673–2682.

8. Brouwer D.H., Gijsbers J.H.-J., Lurvink M.W.-M. Personal exposure to ultrafine particles in the workplace: exploring sampling techniques and strategies // *Annals of Occupational Hygiene.* – 2004. – Vol. 48, № 5. – P. 439–453.

9. Maynard A.D., Kuempel E.D. Airborne nanostructured particles and occupational health // *Journal of Nanoparticle Research.* – 2005. – Vol. 7, № 6. – P. 587–614.

10. Toxic potential of materials at the nanolevel / A. Nel [et al.] // *Science.* – 2006. – Vol. 311, № 5761. – P. 622–627.

11. Elihn K., Berg P. Ultrafine particle characteristics in seven industrial plants // *Annals of Occupational Hygiene.* – 2009. – Vol. 53, № 5. – P. 475–484.

12. Величковский Б.Т. Об экспресс-методе прогнозирования возможного патологического влияния наночастиц на организм // *Бюллетень ВСНЦ СО РАМН.* – 2009. – № 4(68). – С. 72–76.

13. Метод определения дисперсности субмикронных аэрозолей по их спектральной прозрачности / А.А. Павленко [и др.] // *Ползуновский вестник.* – 2009. – № 3. – С. 262–266.

14. Physicochemical characterisation of different welding aerosols / B. Berlinger [et al.] // *Analytical and Bioanalytical Chemistry.* – 2011. – Vol. 399, № 5. – P. 1773–1780.

15. Комельков В.А. Повышение работоспособности быстрорежущего инструмента путем применения ионизированного воздуха с включением микродоз масла И-20А: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново, 2006. – 130 с.

16. Корчагин А.В. Исследование процесса резания в газовых контролируемых средах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2009. – 18 с.

17. Крутиков В.Н., Брегадзе Ю.И., Круглов А.Б. Контроль физических факторов окружающей среды, опасных для человека. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – С. 398–435.

18. Tammet H., Kulmala M. Simulation tool for atmospheric nucleation bursts // *Journal of Aerosol Science*. – 2005. – Vol. 36, iss. 2. – P. 173–196.

19. Variation and balance of positive air ion concentrations in a boreal forest / U. Hörrak [et al.] // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2008. – Vol. 8, № 3. – P. 655–675.

20. Production, growth and properties of ultrafine atmospheric aerosol particles in an urban environment / I. Salma [et al.] // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2011. – Vol. 11, № 3. – P. 1339–1353.

21. Evaluation of an automatic algorithm for fitting the particle number size distributions / T. Hussein [et al.] // *Boreal Environment Research*. – 2005. – Vol. 10, № 5. – P. 337–355.

22. Смирнов В.В. Ионизация в тропосфере. – СПб.: Гидрометеорологическое издательство, 1992. – 312 с.

### References

1. Azarov V.N. Kompleksnaia otsenka pylevoi obstanovki i razrabotka mer po snizheniiu zapylennosti vozdukhnoi sredy promyshlennykh predpriatii [Complex assessment of a dust situation and development of measures for decrease in dust content of the air environment of the industrial enterprises]. Doctor's degree thesis. Rostov-na-Donu, 2003. 334 p.

2. Tetereva E.Iu. Sovershenstvovanie metodov kontrolya i otsenki dispersnogo sostava pyli v vozdukhke rabochei zony i effektivnosti inzhenerno-ekologicheskikh sistem [Improvement of control methods and assessment of disperse composition of dust in air of a working zone and efficiency of engineering-ecological systems]. Ph. D. thesis. Volgograd, 2010. 189 p.

3. Min'ko V.M. Okhrana truda v mashinostroenii [Labor protection in mechanical engineering]. Moscow: Akademiia, 2010. 256 p.

4. Osunsanya T., Prescott G., Seaton A. Acute respiratory effects of particles: mass or number? *Occupational and Environmental Medicine*, 2001, vol. 58, iss. 3, pp. 154-159.

5. Glushkova A.V., Radilov A.S., Rembovskii V.R. Nanotekhnologii i nanotoksikologiya – vzgliad na problemu [Nanotechnologies and nanotoxicology – a view of a problem]. *Toksikologicheskii vestnik*, 2007, no. 26, pp. 42-43.

6. Mai I.V. [et al.]. Otsenka potentsial'nogo zagriazneniia atmosfer-nogo vozdukhha melkodispersnymi chastitsami v zone raspolozheniia mashinostroi-tel'nogo predpriatii [An assessment of potential pollution of at-

mospheric air fine particles in a zone of an arrangement of machine-building enterprise]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Urbanistika*, 2012, no. 2(6), pp. 122-133.

7. Vincent J.H., Clement C.F. Ultrafine particles in workplace atmospheres. *Philosophical Transactions of the Royal Society. A. Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2000, vol. 358(1775), pp. 2673-2682.

8. Brouwer D.H., Gijssbers J.H.-J., Lurvink M.W.-M. Personal exposure to ultrafine particles in the workplace: exploring sampling techniques and strategies. *Annals of Occupational Hygiene*, 2004, vol. 48, no. 5, pp. 439-453.

9. Maynard A.D., Kuempel E.D. Airborne nanostructured particles and occupational health. *Journal of Nanoparticle Research*, 2005, vol. 7, no. 6, pp. 587-614.

10. Nel A. [et al.]. Toxic potential of materials at the nanolevel. *Science*, 2006, vol. 311, no. 5761, pp. 622-627.

11. Elihn K., Berg P. Ultrafine particle characteristics in seven industrial plants. *Annals of Occupational Hygiene*, 2009, vol. 53, no. 5, pp. 475-484.

12. Velichkovskii B.T. Ob ekspress-metode prognozirovaniia vozmozhnogo patologicheskogo vliianiia nanochastits na organizm [About an express method of forecasting of possible pathological influence of nanoparticles on an organism]. *Biulleten' Vostochno-Sibirskogo nauchnogo tsentra Sibirskogo otdeleniia Rossiiskoi akademii meditsinskikh nauk*, 2009, no. 4(68), pp. 72-76.

13. Pavlenko A.A. [et al.]. Metod opredeleniia dispersnosti submikronnykh aerazolei po ikh spektral'noi prozrachnosti [A method of determination of dispersion of submicronic aerosols on their spectral transparency]. *Polzunovskii vestnik*, 2009, no. 3, pp. 262-266.

14. Berlinger B. [et al.]. Physicochemical characterisation of different welding aerosols. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2011, vol. 399, no. 5, pp. 1773-1780.

15. Komel'kov V.A. Povyshenie rabotosposobnosti bystrorezhushchego instrumenta putem primeneniia ionizirovannogo vozdukha s vklucheniem mikrodoz masla I-20A [Increase of operability of the fast-cutting tool by use of the ionized air with inclusion of microdoses of I-20A oil]. Ph.D. thesis. Ivanovo, 2006. 130 p.



16. Korchagin A.V. Issledovanie protsessa rezaniia v gazovykh kontroliruemykh sredakh [Research of process of cutting in gas controlled environments]. Abstract of Ph. D. thesis. Moscow, 2009. 18 p.

17. Krutikov V.N., Bregadze Iu.I., Kruglov A.B. Kontrol' fizicheskikh faktorov okruzhaiushchei sredy, opasnykh dlia cheloveka [Control of the physical factors of environment dangerous to the person]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 2003, pp. 398-435.

18. Tammet H., Kulmala M. Simulation tool for atmospheric nucleation bursts. *Journal of Aerosol Science*, 2005, vol. 36, iss. 2, pp. 173-196.

19. Hörrak U. [et al.]. Variation and balance of positive air ion concentrations in a boreal forest. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, vol. 8, no. 3, pp. 655-675.

20. Salma I. [et al.]. Production, growth and properties of ultrafine atmospheric aerosol particles in an urban environment. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, vol. 11, no. 3, pp. 1339-1353.

21. Hussein T. [et al.]. Evaluation of an automatic algorithm for fitting the particle number size distributions. *Boreal Environment Research*, 2005, vol. 10, no. 5, pp. 337-355.

22. Smirnov V.V. Ionizatsiia v troposphere [Ionization in the troposphere]. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992. 312 p.

Получено 18.04.2016

### Об авторе

**Черный Константин Анатольевич** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: chernyy\_k@mail.ru.

### About the author

**Konstantin A. Chernyi** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department of Life Safety, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: chernyy\_k@mail.ru.