

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЫЛИ

Азимова Н.Н., Бедоидзе М.В., Богданец Д.А., Дзедиров Д.А., Кругликова М.А.
Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону

Ключевые слова: древесная пыль, параметрическая идентификация, ситовый анализ, лазерная дифракция, микрофотографии, математическое моделирование, цифровой двойник.

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию запыленности рабочей зоны механообрабатывающих производств, критичных для безопасности и здоровья персонала, а соответственно влияющих на качество продукции и производительность труда. Созданы информационные основы цифрового двойника условий труда на таких производствах для комплексного обеспечения требований защиты персонала и эффективности технологического процесса. Реализованные в форме наукоемкого ПО модель позволяют получать новые научные данные касательно механизмов изучаемых процессов, планировать предметные эксперименты и формулировать практические рекомендации

THEORETICAL FOUNDATIONS AND EXPERIMENTAL METHODS IN SIZE-SCALE ANALYSIS OF INDUSTRIAL DUST

Azimova N.N., Bedoidze M.V., Bogdanets D.A., Dzhedirov D.A., Kruglikova M.A.
Don State Technical University, Rostov-on-Don

Keywords: wood dust, parametric identification, sieve analysis, laser diffraction, micrographs, mathematical modeling, digital twin.

Аннотация. This work is devoted to the study of the working area dust at machinery, which is critical for the personnel safety, health as well for the product quality and labor efficiency. The base of our elaboration formed as a digital twin combines realistic mathematical descriptions and strongly formulated requirements to personnel protection. Implemented in the form of high-tech software, the model allows to obtain new scientific data related to the mechanisms of the dust formation, transport and sedimentation as well as to formulate rational advises.

Условия труда являются особым фактором механообрабатывающих производств, критично влияющим не только на здоровье персонала, но опосредованно на качество продукции и производительность. Современные тенденции требуют обеспечивать допустимый уровень нагрузки на персонал со стороны неблагоприятной производственной среды уже со стадии проектирования производств. Такой подход стал возможен благодаря широкому внедрению новой концепции техники и технологии – приоритетному созданию цифровых двойников (ЦД) [1]. Соответственно разработка информационных моделей всевозможных технических систем, направленных на реализацию предметных ЦД, является приоритетной-научно-технической задачей. По причине особо тяжелых условий труда на пыльных производствах, востребованность информационной начинки проблемных ЦД особенно высока.

Схематично предлагаемая в работе структура ЦД «Пыль-Эксперт» показана на рисунке 1. Его организация и наполнения соответствуют тому, что каждому уровню физического анализа соответствует своя математика, облеченная в форму конечного специализированного ПО.

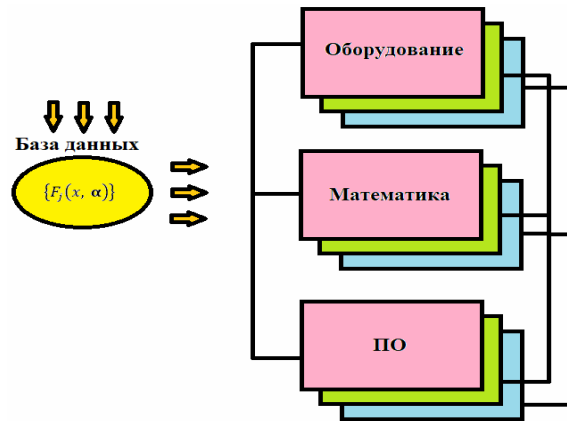


Рис. 1. Структура и состав ЦД «Пыль-Эксперт»

В соответствии с имеющимся исследовательским оборудованием, показанным на рисунке 2, обрабатываются математические и программный компоненты этого ЦД, обеспечивающий ситовый, лазерный и микрофотографический анализ.



Рис. 2. Приборное обеспечение ЦД «Пыль-Эксперт»

Также одной из задач этого исследования ставится конструирование информационных моделей, адекватно описывающих геометрию частиц разнородных технологической пыли и динамики этих частиц в потоке газа с практическим применением выработанных общих идей, положений и подходов к анализу древесной (сосна) пыли, образующейся в процессе пиления.

Геометрия технологической пыли характеризуется двумя параметрами – формой и размером частиц. Поэтому рассмотрим эти характеристики последовательно.

Размер пылевых частиц как случайная величина. С формальной точки зрения пылеобразование следует рассматривать как одно- или многократное дробление [2] твердого материала при его механической обработке. Такой процесс описывается интегро-дифференциальным уравнением:

$$\frac{\partial m(x, t)}{\partial t} = -\lambda(x)m(x, t) + \int_x^{M_0} f(x|y)\lambda(y)m(y, t)dy; \quad (1)$$

$$m(x, 0) = m_0(x), \quad x \in [0, M_0], \quad t \in [0, T],$$

где $m_0(x)$ – начальная массовая плотность распределения.

Последовательно рассмотрим методы и приборное обеспечение анализа пылевой обстановки на пыльных производствах. В зависимости от особенностей последних возможны экспресс- и пост-технологии отбора пылевых проб.

Измерить размер отдельных пылевых частиц и их распределение по этому показателю позволяют три методики: ситового анализа, лазерной дифракции и непосредственных измерений на микрофотографиях. При этом во всех случаях вопрос репрезентативности выборки остается открытым.

Поскольку реальная форма частиц отлична от сферической, и их геометрия характеризуется, как минимум, тремя размерами $\mathbf{r} = \begin{pmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{pmatrix}$ с функциями распределения $F_x(r_x)$, $F_y(r_y)$, $F_z(r_z)$.

Рассмотрим последовательно математические основы геометрического анализа пылевых частиц, его некоторые результаты на доступных образцах, а также возможности компьютерной имитации динамики пыли в воздушном потоке.

При конструировании формульного вида эмпирической функции распределения частиц по размеру **при ситовом анализе** обычно определяют:

$$F(x), p(x) = \frac{d}{dx} F(x), \quad (2)$$

$$\{m_i\}: m_i = \rho \int_{x_{i-1}}^{x_i} x^3 p(x) dx = \rho \int_{x_{i-1}}^{x_i} x^3 dF(x), \quad (3)$$

где m_i – непосредственно измеряемые величины; $i = 1, 2, \dots, N$; $x_0 = 0$; $x_N = x_{\max}$ – известные размеры ситовых ячеек.

Кроме того требуется сформулировать гипотезу касательно $F(x) = F(x, \alpha)$, где α – набор параметров, определяющих форму и масштабные характеристики.

Математически задачи параметрической идентификации $F(x, \alpha)$ записывается как:

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{\int_{x_{i-1}}^{x_i} x^3 dF(x, \alpha)}{\int_{x_0}^{x_N} x^3 dF(x, \alpha)} - \frac{m_i^{\text{эксн}}}{\sum_{i=1}^N m_i^{\text{эксн}}} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

При идентификации распределений в **LALLS-анализе** [3] определяют, как и в ситовом анализе. При этом непосредственно измеряются величины:

$$Q(x, \alpha) = \frac{\int_0^x p(x, \alpha) x^4 dx}{\int_0^\infty p(x, \alpha) x^4 dx}, \quad (5)$$

а параметрическая идентификация $F(x, \alpha)$ сводится к задаче математического программирования:

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{\int_0^{x_i} x^4 dF(x, \alpha)}{\int_0^\infty x^4 dF(x, \alpha)} - Q(x, \alpha)^{\text{эксн}} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (6)$$

В **визуальном (микроскопическом) анализе** имеется возможность определять два видимых размера частицы – длину x и ширину y . Это главное

достоинство метода. Соответственно математическая обработка требует определять две функции распределения:

$$F(x), F(y), p(x) = \frac{d}{dx} F(x), p(y) = \frac{d}{dy} F(y), \quad (7)$$

где $\left\{ \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_i \right\}$ – экспериментально измеряемые величины. При этом расчет аэродинамического размера требует предложить гипотезу касательно третьего (невидимого) размера.

Расчёт интегральных характеристик распределения (нормированных моментов или заутеровских диаметров) осуществляется по формулам:

$$k_{nm} = \left[\frac{\int_0^\infty x^n dF(x, \alpha)}{\int_0^\infty x^m dF(x, \alpha)} \right]^{\frac{1}{n-m}} / \frac{\int_0^\infty x^1 dF(x, \alpha)}{\int_0^\infty x^0 dF(x, \alpha)}, k_{nm}^{эксн} = \left[\frac{\sum_{i=1}^I x_i^n}{\sum_{i=1}^I x_i^m} \right]^{\frac{1}{n-m}} / \frac{\sum_{i=1}^I x_i^1}{\sum_{i=1}^I x_i^0}, \quad (8)$$

$$n = 1, 2, \dots, 4, m = 0, \dots, n,$$

на основе которых формулируется задача параметрической идентификации $F(x, \alpha)$:

$$\sum_{n=1}^4 \sum_{m=0}^{n-1} (k_{nm} - k_{nm}^{эксн})^2 \rightarrow \min, \quad (9)$$

Важным фактором при микроскопическом анализе размера пылевых частиц выступает субъективизм, исключение которого достигается множественным повтором с привлечением нескольких исполнителей (**экспертов**). Эффективность такой процедуры показана на рисунке 3.

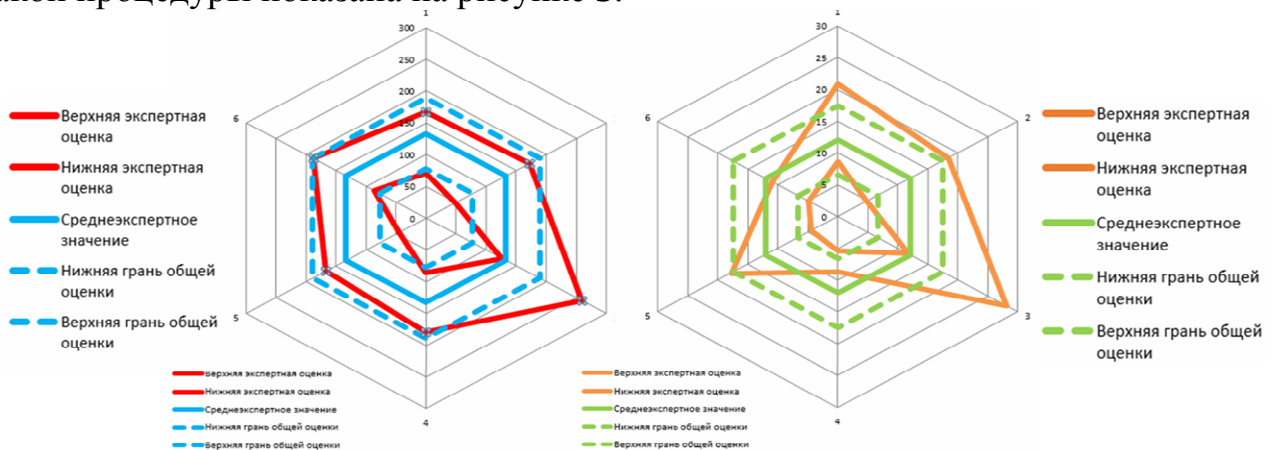


Рис. 3. Экспертные оценки при визуальном (микроскопическом) анализе технологической древесной пыли

Поскольку в технике микроскопических измерений размеров доступны лишь два из трёх (в данном случае D и d) касательно третьего можно лишь строить гипотезы. В данной работе предлагается оценивать невидимый размер δ тремя различными способами: 1) $\delta = \sqrt{D \cdot d}$ (верхнее вероятное значение); 2) $\delta = d$ (среднее значение) и 3) $d/2 \leq \delta \leq d$ с равной вероятностью в указанном интервале (нижнее предполагаемое значение).

Согласно предложенной выше аппроксимации величину D будем разыгрывать как случайное число с функцией распределения

$$F(D) = 1 - e^{-4,5D/738} = 1 - e^{-D/164}, \quad (10)$$

а величину d рассчитывать на основе D по формуле:

$$d = 1,2 \cdot \sqrt{D}, \quad (11)$$

Затем в рамках одного из трёх сценариев разыгрываем вероятную величину третьего невидимого размера δ .

Из физических соображений наиболее вероятный аэродинамический размер (в предположении, что форма пылинки близка к прямоугольному параллелепипеду со сторонами D , d и δ) определяется соотношением:

$$D_{\text{eff}} = \frac{V}{S} = \frac{3 \cdot D \cdot d \cdot \delta}{Dd + d\delta + \delta D}, \quad (12)$$

в котором V – объем частицы, а S – вероятная площадь поверхности частицы, перпендикулярная воздушному потоку.

Компьютерный эксперимент по синтезу вероятного аэродинамического размера показал, что этот параметр подчиняется распределению Розина – Раммлера – Вейбулла – Гнеденко. Для определения параметров модели D и n решалась переопределённая система уравнений (интегрирование осуществляется по величине D_{eff}):

$$\lg \left\{ \int_0^\infty D_{\text{eff}} d \left[1 - e^{-(D_{\text{eff}}/D)^n} \right] \right\} = \lg M(D_{\text{eff эксп}}), \quad (13)$$

$$\lg \left\{ \int_0^\infty (D_{\text{eff}} - M(D_{\text{eff эксп}}))^2 d \left[1 - e^{-(D_{\text{eff}}/D)^n} \right] \right\} = 2 \lg \sigma(D_{\text{eff эксп}}), \quad (14)$$

$$\lg \left\{ \frac{\int_0^\infty (D_{\text{eff}} - M(D_{\text{eff эксп}}))^3 d \left[1 - e^{-(D_{\text{eff}}/D)^n} \right]}{\left(\int_0^\infty (D_{\text{eff}} - M(D_{\text{eff эксп}}))^2 d \left[1 - e^{-(D_{\text{eff}}/D)^n} \right] \right)^{3/2}} \right\} = \lg \text{Skewness}(D_{\text{eff эксп}}), \quad (15)$$

$$\lg \left\{ \frac{\int_0^\infty (D_{\text{eff}} - M(D_{\text{eff эксп}}))^4 d \left[1 - e^{-(D_{\text{eff}}/D)^n} \right]}{\left(\int_0^\infty (D_{\text{eff}} - M(D_{\text{eff эксп}}))^2 d \left[1 - e^{-(D_{\text{eff}}/D)^n} \right] \right)^2} \right\} = \lg \text{Kurtosis}(D_{\text{eff эксп}}), \quad (16)$$

в которой тысяча величин $D_{\text{eff эксп } i}$ разыгрывались на основании описанного выше трехсценарного алгоритма.

Анализ полученных значений позволяет рекомендовать для расчета специализированной аспирационной системы следующую зависимость:

$$F(D) = 1 - e^{-(D/25)^2}. \quad (17)$$

В ходе выполнения данного исследования был проведен гранулометрический анализ технологической пыли, изучены статистические закономерности в дисперсном составе технологической пыли различного происхождения, разработанный ряд новых математических результатов облегчает идентификацию дисперсного состава сыпучих сред. Предложена рациональная структура ЦД и сформулирована потребность в их научном и информационном наполнении.

Список литературы

1. Jiang Y., Yin S., LiK., Luo H., Kaynak O. Industrial applications of digital twins // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2021, vol. 379, no. 2207, p. 20200360. DOI: 10.1098/rsta.2020.0360.
2. Королев Л.В. О распределении размеров частиц при дроблении // Информатика и ее применения. – 2009. – Т. 3, Вып. 3. – С. 60-68.
3. Азимова Н.Н. Снижение концентрации пыли и уровней шума в рабочей зоне при абразивной резке: Дисс. ... канд. тех. наук. – Ростов-на-Дону, 2020. – 165 с.

Сведения об авторах:

Азимова Наталья Николаевна – к.т.н., доцент кафедры «Прикладная математика»;

Бедоидзе Мария Васильевна – старший преподаватель кафедры «Прикладная математика», аспирант;

Богданец Диана Андреевна – студент;

Джедиров Дмитрий Александрович – аспирант;

Кругликова Марина Алексеевна – студент.