

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ПЫЛЕВОЙ ОБСТАНОВКИ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*Бараниченко В.В., Бедоидзе М.В., Рахманов А.И., Русяков Д.В.,
Цымбалов Д.С.*

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону

Ключевые слова: технологическое оборудование, рабочая зона, кабины технологического транспорта, условия труда, спецоценка, запыленность, цифровой двойник, математическое моделирование, прогнозирование пылевой обстановки.

Аннотация. Разработана комплекс измерительных методик, математических моделей и программных средств, позволяющий надежно квалифицировать состояние воздушной среды в рабочей зоне технологического оборудования и специализированных транспортных средств в части запыленности. Взаимодополняемость интегрированных в методику подходов качественно повышает достоверность таких оценок. Практическая апробация разработки выполнена на примере распила крупногабаритных древесных заготовок циркулярным инструментом.

MATHEMATICAL MODELS AND COMPUTING RECEIPTS FOR DIGITAL TWINNS RELATED TO DUST CONTAMINATION IN LABOR ZONE OF TECHNOLOGY EQUIPMENT

*Baranichenko V.V., Bedoidze M.V., Rakhmanov A.I., Ruslyakov D.V.,
Tsymbalov D.S.*

Don State Technical University, Rostov-on-Don

Keywords: technology equipment, labor zone, cabins of technology vehicles, estimation of labor conditions, dust contamination, digital twin, mathematical modeling, scientific prediction.

Abstract. A set of measurement techniques, mathematical models and software has been developed to reliably qualify the state of the air environment in the working area of technological equipment and specialized vehicles in terms of dust content. The complementarity of the approaches integrated into the methodology qualitatively increases the reliability of such assessments. Practical testing of the development is carried out using the example of cutting large-sized wood blanks with a circular tool.

Техногенная пыль, образующаяся в различных (строительных, промышленных, аграрных) процессах преобразования природных материалов и полуфабрикатов не только снижает качество конечного продукта, но загрязняет окружающую природную среду и существенно вредит здоровью человека [1]. Практическое снижение её негативного воздействия обеспечивается различными аспирационными системами [2]. Конечная эффективность технологического оборудования, таким образом, подразумевает наличие в его составе рациональных средств пылеулавливания. Современный подход к проектированию технологического оборудования и оснастке базируется на высокореалистичных цифровых двойниках (ЦД), непременным атрибутом которых выступают надлежащие элементы производственной безопасности [3]. Таким образом, цель данного исследования – отработка адекватных

математических моделей и реализующих компьютерных алгоритмов для ЦД пылевой обстановки на современных производствах и кабинах технологического транспорта – представляется вполне актуальной.

При реализации соответствующей исследовательской программы авторы руководствовались соображением, что надёжное определение тонких характеристик технологической пыли, сценарное моделирование запыления рабочей зоны оборудования и кабин технологического транспорта, а также предпроектный расчет аспирационных систем нуждаются в специализированных программно-аппаратных комплексах. Решаемые в рамках этой программы задачи схематично отображены на рисунке 1.



Рис. 1. Общий подход к реализации ЦД производственных условий на рабочих местах в промышленности и в кабинах технологического транспорта

Применительно к обеспыливанию рабочей зоны создание ЦД осуществляется в следующих направлениях: 1) автоматизация диагностики состояния воздушной среды в рабочей зоне (на предмет запыленности); 2) имитационное компьютерное моделирование состава пылевоздушной смеси на рабочих местах механообрабатывающих производств и в кабинах технологического транспорта; 3) проектирование действенных аспирационных систем на основе предварительных аэромеханических расчетов. Ниже рассмотрим результаты наших исследований по первому направлению.

Создание этого элемента ЦД подразумевает привязку математики и алгоритмических решений, в т.ч. реализующего программного обеспечения (ПО), к конкретному измерительному оборудованию и/или методике (рис. 2). На данный момент средствами экспериментальными измерения запыленности и размерного анализа пылевых частиц служат аспиратор Мигунова, Аэрокон, LALLS-анализатор, лабораторные вибросита, оптический и электронный микроскопы.

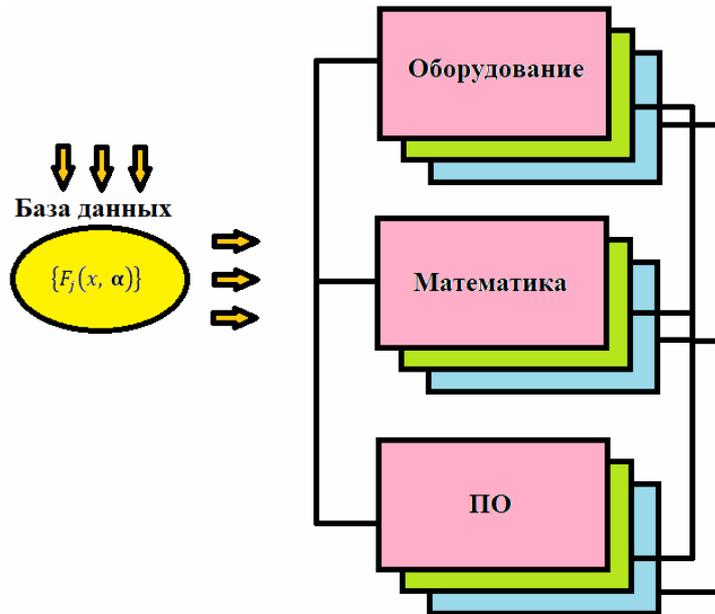


Рис. 2. Структура модуля «ПыльЭксперт» в составе разрабатываемого ЦД

Принципиально важным в нашем подходе является неперемное сочетание двух и более доступных методик для количественного и качественного исследования рабочей зоны на предмет запыленности. Это обусловлено физическими ограничениями, присущими каждому из них. Так, например, рисунок 3 демонстрирует предпочтительность электронного микроскопа в исследованиях металлической пыли, а оптического – пыли древесной.

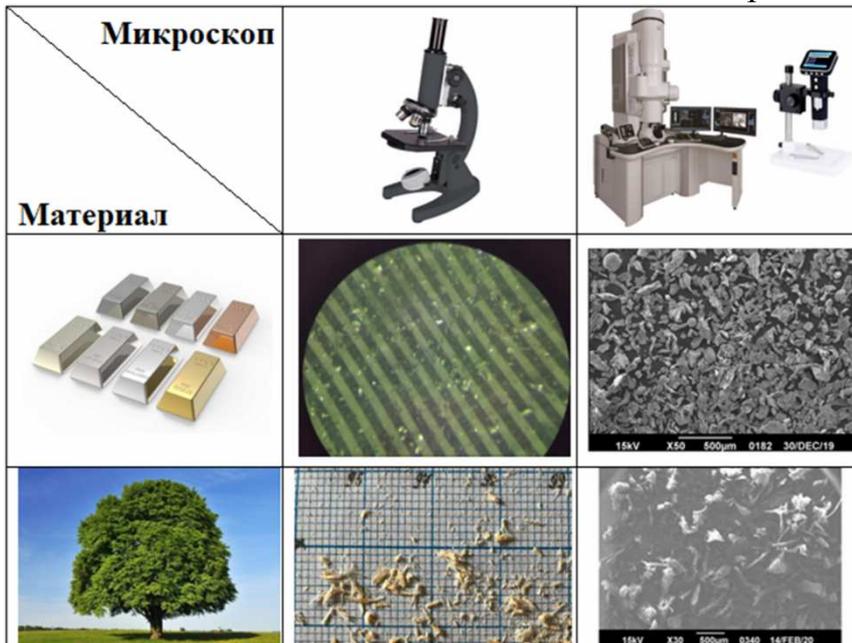


Рис. 3. Пример эффективности оборудования в исследованиях технологической пыли

Разработанные авторами математические модели и алгоритмы размерного анализа технологической пыли сводится к следующему.

Алгоритм идентификации искомых функций распределения частиц по размеру в ситовом методе. Требуется определять:

$$F(x), p(x) = \frac{d}{dx} F(x), \tag{1)}$$

$$\{m_i\}: m_i = \rho \int_{x_{i-1}}^{x_i} x^3 p(x) dx = \rho \int_{x_{i-1}}^{x_i} x^3 dF(x), \quad (2)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, N$, $x_0 = 0$, $x_N = x_{\max}$ – непосредственно измеряемые величины.

Адекватная гипотеза касательно $F(x) = F(x, \alpha)$ где α – набор параметров, характеризующих форму и масштабы распределения.

Математическая постановка задачи параметрической идентификации $F(x, \alpha)$:

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

Алгоритм идентификации искомым функций распределения частиц по размеру при LALLS-анализе. Требуется определять:

$$F(x), \quad p(x) = \frac{d}{dx} F(x), \quad (4)$$

Непосредственно измеряемые величины:

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

Адекватная гипотеза касательно $F(x) = F(x, \alpha)$, где α – набор параметров, характеризующих форму и масштабы распределения.

Математическая постановка задачи параметрической идентификации $F(x, \alpha)$:

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

Алгоритм идентификации искомым функций распределения частиц по размеру при визуальном (микроскопическом) анализе. Требуется определять:

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

где $\left\{ \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_i \right\}$ – непосредственно измеряемые величины.

Адекватная гипотеза касательно $F(x) = F(x, \alpha)$, где α – набор параметров, характеризующих форму и масштабы распределения; гипотеза касательно третьего (невидимого) размера.

Расчёт интегральных характеристик (простых нормированных моментов или, как вариант, нормированных заутеровских диаметров).

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

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

Постановка задачи 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 4.

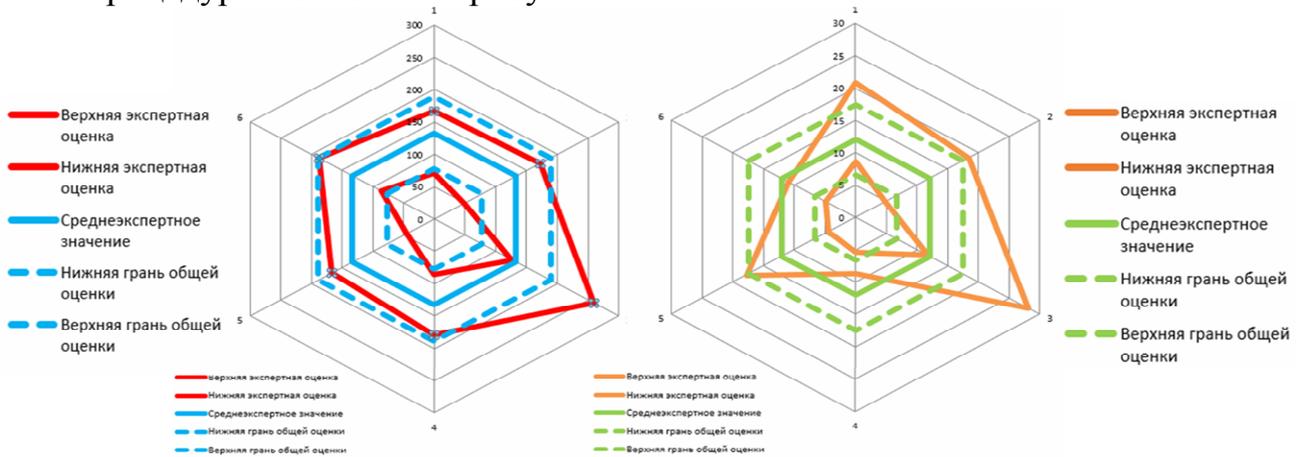


Рис. 4. Экспертные оценки при визуальном (микроскопическом) анализе технологической древесной пыли

В качестве примера успешного использования обрабатываемого авторами подхода к предметным ЦД приведем результаты идентификации фракционного состава пыли, полученной при сверлении сосны различными диаметрами (рис. 5).

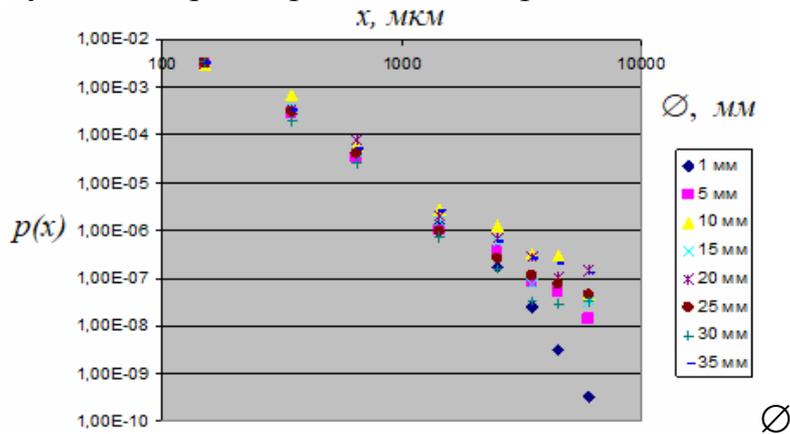


Рис. 5. Практика размерного анализа технологической пыли

Он имеет следующее формульное выражение:

$$p(x, d) = \frac{1 - (0,013 - 0,0027 \ln d)}{120} e^{-\frac{x}{120}} + \frac{0,013 - 0,0027 \ln d}{615 + 272 \ln d} e^{-\frac{x}{615 + 272 \ln d}}. \quad (10)$$

Физическая интерпретация этой формулы очевидна: распределение мелкой пыли по размеру не зависит от диаметра сверла, в то время как размерная характеристика крупных выкрашиваемых частиц (не подвергшихся последующему многократному измельчению) прямо пропорционально диаметру сверла.

Выводы. Отработан комплекс методик определения дисперсных характеристик технологической пыли, включающий аппаратные средства измерений, математические модели и реализующее специализированное ПО. Разработка апробирована на образцах древесной пыли, полученной сверлением сосны. Полученные результаты естественным образом обобщаются на другие материалы и способы их обработки.

Список литературы

1. Bart Ostro, Yewande Awe, Ernesto Sánchez-Triana. When the Dust Settles: A Review of the Health Implications of the Dust Component of Air Pollution. – 2021 International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank. – 75 p.
2. Зиганшин М.Г. Проектирование аппаратов пылегазоочистки. – М.: Экопресс, 1998. – 505 с.
3. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения.

Сведения об авторах:

Бараниченко Вадим Владимирович – аспирант;
Бедоидзе Мария Васильевна – аспирант;
Рахманов Арслан Икрамович – бакалавр;
Русяков Дмитрий Викторович – докторант;
Цымбалов Денис Сергеевич – аспирант.