

## Выявления физико-технических ограничений в оптическом методе гранулометрии технологической пыли

*М.В. Бедоидзе, Д.А. Богданец, Д.В. Богомоленко, Д.А. Джедиров,  
Д.С. Сулименко*

*Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** Опытным путем собраны образцы металлической пыли, образующейся при фрезеровании серого чугуна. В экспериментах варьировались режим работы станка, точки сбора пыли, а также условия обдува. Для надежности результата физический этап анализа размерных характеристик пыли выполнялся двумя методами – просеиванием и непосредственными оптическими измерениями. Выявлены существенные расхождения статистических параметров, полученных разными способами. Предложена и подтверждена гипотеза, объясняющая выявленные различия. Рекомендован комплексный подход к физическому этапу дисперсному анализу сыпучих сред.

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

Важные для оценки качества производственной воздушной среды статистические характеристики технологической пыли [1-3] (размер и особенности формы) обычно определяются одним из способов [4]: 1) путем ситового анализа [5-7], 2) непосредственными измерениями на микрофотографиях [8] и 3) LALLS- технологией [9]. Поскольку каждому из методов присущи специфические преимущества и недостатки, их результативность следует рассматривать как ситуативно обусловленную характеристику. Поэтому создаваемая авторским коллективом унифицированная программа физико-математического анализа дисперсного состава сыпучих материалов [10], схема которой приведена на рис. 1, предусматривает все применяемые варианты. Целесообразность использовать подобную структуру подтверждается характеристиками инструментальных методик, собранными в табл. 1. Как видно из представленных в ней данных, использование двух различных способов анализа образца позволяет существенно повысить достоверность результата.

---

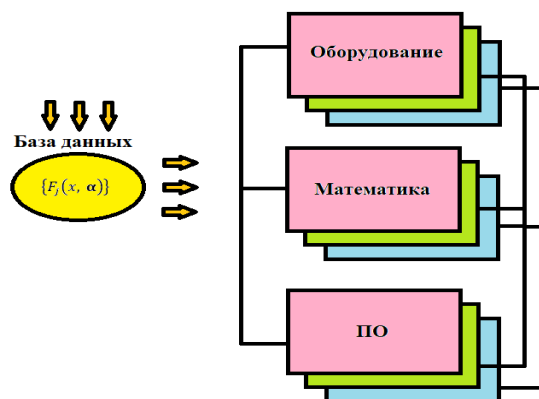


Рис. 1. – Структура и состав цифрового двойника [11,12] «Пыль-Эксперт»

Таблица №1

Особенности различных методов определения дисперсного состава сыпучих материалов

Метод	Ситовый	Оптический	LALLS
Описание			
Объем выборки	большой	малый	большой
Разрешающая способность	умеренный	высокий	высокий
Работа с коагуляцией	+	-	-
Трудоемкость физического анализа	низкая	высокая	низкая
Сложность математической обработки	умеренная	высокая	высокая
Ограничение на материал	отсутствует	незначительно	имеются
Ограничение на диапазон размеров	заметные	заметные	слабые

В качестве примера рассмотрим пыль, образующуюся при фрезеровании серого чугуна СЧ20 по ГОСТ 1412-85. Пыль получена в процессе обработки заготовки на двух станках: первый использовал обдув, второй – без обдува. Каждый из станков функционировал последовательно в трех режимах, а технологическая пыль собиралась в пяти контрольных точках, показанных на рис. 2. Механические характеристики режима резания, отвечающие экспериментам рис. 1,2, приведены в табл. 2,3.

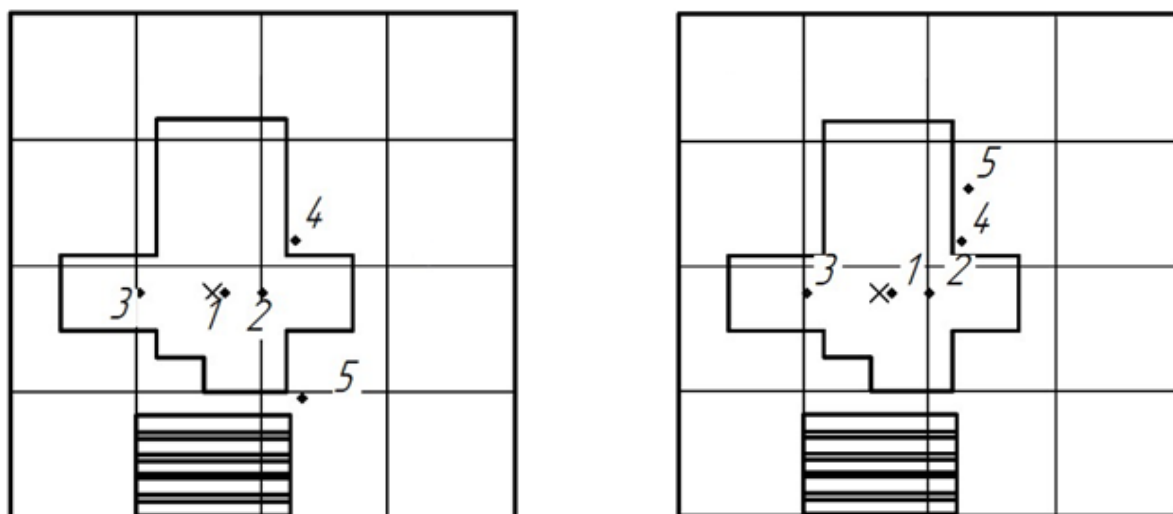


Рис. 2. – Положение контрольных точек для сбора пыли: от станка вертикально-фрезерного 6А12А – слева и от станка консольно-фрезерного вертикального 6Р13 – справа.

Таблица №2

Режимы работы вертикального консольно-фрезерного станка 6Р13 без обдува

Фреза	Номер режима	Глубина резания, мм	Подача, мм/мин
Торцевая	1	2,5	160
	2	1,5	125
	3	0,5	80

Таблица 3

Режимы работы вертикально-фрезерного станка 6А12А с обдувом

Фреза	Номер режима	Глубина резания, мм	Подача, мм/мин
Концевая	1	3,5	80
	2	2	125
	3	2	100

В контрольных точках собирались пробы (всего 90 образцов поскольку каждый эксперимент повторялся трижды), которые затем подвергались ситовому и оптическому анализу. Результаты представлялись в форме двухпараметрического модельного распределения Розина – Рамллера – Вейбулла – Гнеденко [13]:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{D}\right)^n}, \quad P(x) = \frac{d}{dx} F(x) = \frac{n}{D} \cdot \left(\frac{x}{D}\right)^{n-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{D}\right)^n}. \quad (1)$$

Оказалось, что для всех опытов параметры модели (1)  $D$  и  $n$ , полученные просеиванием и непосредственными автоматизированными измерениями частиц на фотографиях, существенно отличаются (см. табл. 4). Выявленное расхождение можно объяснить следующим образом. Во-первых, микрофотографии (пример на рис. 3) получались при помощи камеры смартфона, а подложкой служила писчая бумага. Это ограничивало минимальный размер регистрируемых частиц разрешающей способностью камеры и микроструктурой бумаги. Во-вторых, из выборки, вероятно, выпадали самые мелкие частицы, склонные к скоплению на дне баночек с пробами. Наконец, использованная для автоматизированного измерения размера частиц программа [8] позволяет за приемлемое время обработать изображение с числом частиц до полутора тысяч.



Рис. 3. – Образец микрофотографий для автоматизированного размерного анализа пыли

Таблица № 4

Параметры модели  $D$  и  $n$ , полученные различными методами (индекс  $s$  отвечает ситовому анализу, а индекс  $o$  – оптическому); приведен фрагмент данных

Код опыта		I(б) - 2(1)	I(б) - 3(1)	I(б) - 3(3)	I(б)- 1(2)	I(б) -2 (4)	I(б)-1(1)
Сита	Ds	0,13584	0,093667	0,008923	0,0375	0,397978	0,101944
	ns	0,689098	0,584734	0,36655	0,50745	0,691881	0,609016
Оптика	Do	1,406843	1,003095	1,1783	1,336945	0,44286	1,389417
	po	0,9265	0,7885	0,8515	0,9105	1,0035	0,905

В совокупности перечисленные обстоятельства позволяют сформулировать гипотезу, согласно которой оптическим методом регистрируются лишь частицы, начиная с некоторого минимального размера  $x_{\min}$ . При наличии такого ограничения наблюдаемая в оптическом анализе функция распределения частиц по размеру имеет вид:

$$F(x) = \begin{cases} 0, & x < x_{\min} \\ 1 - e^{-\left(\frac{x-x_{\min}}{D}\right)^n} & \end{cases} . \quad (2)$$

Логично предположить, что  $x_{\min} = kD_s$ , где  $k$  – относительный размер слепой зоны нашего оптического анализа. Очевидно, что данный метод адекватен при  $k \ll 1$ ; в противном случае его использование недопустимо. Поэтому авторы вычислили величину  $k$  для каждого из опытных вариантов табл. 4. Для этого решалась оптимизационная задача:

$$\Phi(k) = \int_0^{10D_s} \left[ H(x - kD_s) \cdot \left[ 1 - e^{-\left(\frac{x-kD_s}{D_s}\right)^{n_s}} \right] - \left[ 1 - e^{-\left(\frac{x}{D_o}\right)^{n_o}} \right] \right]^2 dx \rightarrow \min , \quad (3)$$

где  $H(x)$  – функция Хевисайда. Отметим, что перед практической обработкой при помощи (3) данных табл. 4 выполнялся тестовый компьютерный эксперимент с выборкой случайной величины, отвечающей функции распределения (2) при различной ширине слепой зоны  $k$ . Результаты этого эксперимента подтвердили возможность надежно определять параметр  $k$  как решение задачи (3).

Выполненное согласно (3) по данным табл. 4 определение масштаба слепой зоны оптического метода  $kD_s$  проиллюстрировано на рис. 4 и состоит в следующем: оптический метод в подавляющем большинстве опытов

упустил критичные для качества производственной воздушной среды микрочастицы размером менее 30 мкм.

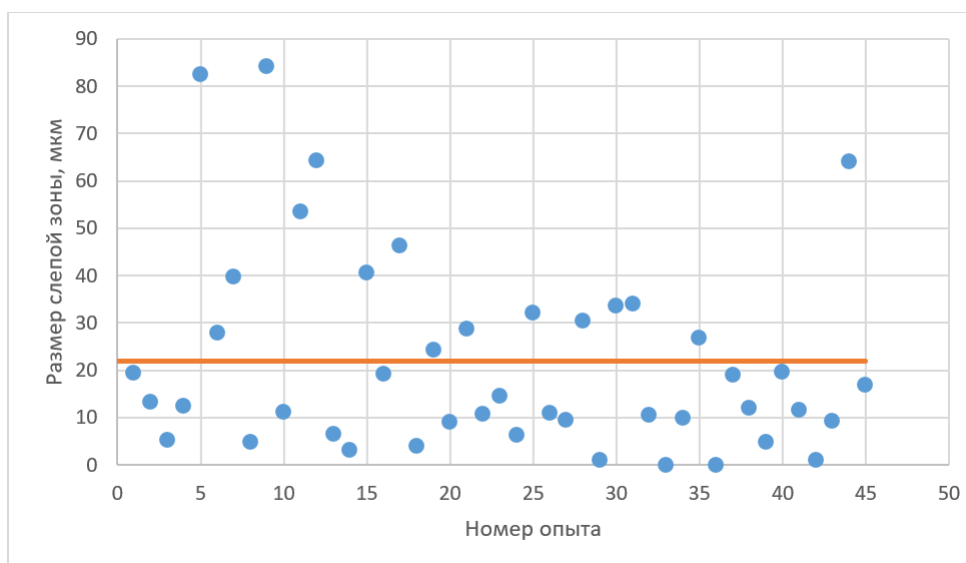


Рис. 4. – Величина слепой зоны оптического анализа размерных характеристик пыли

Проведен сравнительный анализ ситового и оптического методов исследования гранулометрического состава технологической пыли. Установлены и объяснены ограничения оптических измерений. Подтверждена целесообразность разнопланового подхода к анализу структуры и характеристик сыпучей среды.

### Литература

1. HSE, Health Priority Plan. Occupational Lung Disease. Archived 8 Jan 2018. URL: [books.hse.gov.uk/gempdf/HSE\\_Lung\\_Disease\\_Flyer.pdf](https://books.hse.gov.uk/gempdf/HSE_Lung_Disease_Flyer.pdf)
2. HSE (2020) EH40/2005 Workplace exposure limits. Containing the list of workplace exposure limits for use with the Control of Substances Hazardous to Health Regulations (as amended). Fourth edition, published 2020. HSE Books. URL: [hse.gov.uk/pubns/priced/eh40.pdf](https://hse.gov.uk/pubns/priced/eh40.pdf)

3. HSE (2022) Wood dust. Controlling the risks. Woodworking Sheet No 23 (Revision 3). Information Sheet WIS23 (rev3). 05/22. URL: [hse.gov.uk/pubns/wis23.pdf](https://hse.gov.uk/pubns/wis23.pdf)

4. Азимова Н.Н. Снижение концентрации пыли и уровней шума в рабочей зоне при абразивной резке / Дисс. Канд. Тех. наук. Ростовн/Д., 2020.

5. Sieve Analysis. Taking a close look at quality / RETSH GmbH. 2015. URL: [retsch.com/files/8785/expert-guide-sieving.pdf](https://retsch.com/files/8785/expert-guide-sieving.pdf).

6. Котляр В.Д., Братский Д.И., Устинов А.В. Вещественный состав и дообжиговые керамические свойства глинистых опок // Инженерный вестник Дона. – 2010. № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2010/249](https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2010/249).

7. Беспалов В.И., Протопопова Д.А. Экспериментальные исследования процесса обеспыливания воздуха рабочей зоны агрегата питания асфальтобетонного завода // Инженерный вестник Дона. – 2012. № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2012/721](https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2012/721).

8. Сулименко А.С., Бедоидзе М.В., Грызлов В.Д. и др. Автоматизированный анализ размерных характеристик полидисперсных сред по микрофотографиям // Навигатор в мире науки и образования. 2024. № 01(62). с.252-264.

9. Kaye W., McDaniel J.B. Low-Angle Laser Light Scattering – Rayleigh Factors and Depolarization Ratios // Applied Optics. 1974. V. 13, Issue 8. pp. 1934-1937.

10. Азимова Н.Н., Бедоидзе М.В., Богданец Д.А., Джедиров Д.А., Кругликова М.А. Теоретические основы и экспериментальные методы гранулометрического анализа технологической пыли // Автоматизированное проектирование в машиностроении. 2024. № 17. с. 48-53.

11. Jiang Y., Yin S., Li K., Luo H., Kaynak O. Industrial applications of digital twins // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical,

Physical and Engineering Sciences. V. 379, № 2207, pp. 20200360. Oct. 2021.  
DOI: 10.1098/rsta.2020.0360.

12. Jebelli H., Asadi S., Mutis I., Liu R., Cheng J. Digital Twins in Construction and the Built Environment. Reston, VA: American Society of Civil Engineers. doi:10.1061/9780784485606. ISBN 978-0-7844-8560-6.

13. Адушкин В.В., Попель В.И., Шишаева С.И. Анализ мелкодисперсной фракции при разрушении горных пород взрывом и образовании скальных оползней // Записки горного института. 2007. т.171. с. 32-38.

### References

1. HSE, Health Priority Plan. Occupational Lung Disease. Archived 8 Jan 2018. URL: [books.hse.gov.uk/gempdf/HSE\\_Lung\\_Disease\\_Flyer.pdf](https://books.hse.gov.uk/gempdf/HSE_Lung_Disease_Flyer.pdf)

2. HSE (2020) EH40/2005 Workplace exposure limits. Containing the list of workplace exposure limits for use with the Control of Substances Hazardous to Health Regulations (as amended). Fourth edition, published 2020. HSE Books. URL: [hse.gov.uk/pubns/priced/eh40.pdf](https://hse.gov.uk/pubns/priced/eh40.pdf)

3. HSE (2022) Wood dust. Controlling the risks. Woodworking Sheet No 23 (Revision 3). Information Sheet WIS23 (rev3). 05/22. URL: [hse.gov.uk/pubns/wis23.pdf](https://hse.gov.uk/pubns/wis23.pdf)

4. Azimova N.N. Snizhenie koncentracii pyli i urovnej shuma v rabochej zone pri abrazivnoj rezke [The dust concentration and the noise level reelection within the labor zone are by abrasive cutting]. Diss. Kand. Teh. nauk. Rostovn/D., 2020.

5. Sieve Analysis. Taking a close look at quality. RETSH GmbH. 2015. URL: [retsch.com/files/8785/expert-guide-sieving.pdf](https://retsch.com/files/8785/expert-guide-sieving.pdf).

6. Kotljar V.D., Bratskij D.I., Ustinov A.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2010. № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2010/249](https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2010/249).





7. Bepalov V.I., Protopopova D.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012. № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2012/721](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2012/721).
8. Sulimenko A.S., Bedoidze M.V., Gryzlov V.D. i dr. Navigator v mire nauki i obrazovaniya. 2024. № 01(62). pp. 252-264.
9. Kaye W., McDaniel J.B. Applied Optics. 1974. V. 13, Issue 8. pp. 1934-1937.
10. Azimova N.N., Bedoidze M.V., Bogdanec D.A., Dzhedirov D.A., Kruglikova M.A. Avtomatizirovannoe proektirovanie v mashinostroenii. 2024. № 17. pp. 48-53.
11. Jiang Y., Yin S., LiK., Luo H., Kaynak O. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. V. 379, № 2207, pp. 20200360. Oct. 2021. DOI: 10.1098/rsta.2020.0360.
12. Jebelli H., Asadi S., Mutis I., Liu R., Cheng J. Digital Twins in Construction and the Built Environment. Reston, VA: American Society of Civil Engineers. doi:10.1061/9780784485606. ISBN 978-0-7844-8560-6.
13. Adushkin V.V., Popel' S.I., Shishaeva S.I. Zapiski gornogo instituta. 2007. t.171. pp. 32-38.

**Дата поступления: 14.11.2024**

**Дата публикации: 1.01.2025**