

## К оценке характеристик пыли с использованием дисперсионного анализа аддитивно-симплексного типа для снижения проскока частиц в пылеуловителях аспирации стройиндустрии

*С.А. Кошкарев, А.А. Ледяева, А.С. Милованов, И.И. Новоселов, В.В.*

*Лупиногин, Д.С. Селеменев, Д.О. Склярова, К.С. Кошкарев*

*Волгоградский государственный технический университет,  
Волгоград*

**Аннотация:** Статья посвящена вопросу повышения экологической безопасности стройиндустрии совершенствованием пылеуловителей систем обеспыливания с использованием аддитивно-комплексного дисперсионного анализа выбросов пыли системами аспирации. В статье предложено совершенствование комплексного дисперсионного анализа с использованием в функциях выхода критериев гидродинамики. Модифицированные выходные данные и аддитивно-симплексный подход к оценке характеристик - эквивалентных размеров и скоростей седиментации-витания частиц пыли позволяют определить диапазоны их изменения с более высокой степенью точности результаты. Распределения по величинам критериев гидродинамики позволяют получить более надежные данные по скоростям седиментации и эквивалентным размерам частиц для исследованных образцов пыли стройматериалов. Аналитический подход к определению плотности распределения численных значений критериев позволил уточнить значения скоростей седиментации и эквивалентных размеров частиц диапазона их изменения в функции выхода аддитивно-комплексного комплексного дисперсионного анализа частиц пыли. Полученные регрессии при обработке результатов исследований были использованы при разработке устройств очистки выбросов пыли дисперсных стройматериалов, позволивших значительно снизить проскок пыли в системах обеспыливания аспирации при снижении выбросов в атмосферу на предприятиях стройиндустрии. Данный подход представляется одним из наиболее эффективных способов повышения экологической безопасности стройиндустрии.

**Ключевые слова:** Пыль, стройматериал, пылеуловитель, очистка, проскок, симплекс, дисперсионный анализ, скорость, седиментация, критерий, выброс, атмосфера, обеспыливание, аспирация.

В обеспыливающих системах аспирации устанавливаются пылеуловители значительной вариативности конструкций и использующихся в них физических механизмов - принципов улавливания твердых частиц. В циклонах различных типов и модификаций, ВЗП [1,2], ряда конструкций пылеуловителей мокрой очистки, например [3], применяется инерционно-гравитационный способ сепарации пыли из очищаемого пылегазового

---

потока. Появляющиеся новые модификации пылеулавливающих устройств [2-4] предполагают доводку конструкции и отладку режима работы в конкретном технологическом процессе.

Комплексный метод дисперсионного анализа пыли апробирован практикой и получил развитие в ряде работ, например, [5-10]. Параметр проскока частиц пылеулавливающих устройствах инерционно-гравитационного типа (циклоны, ВЗП, фильтрующе-псевдооживленного слоя), применяющихся для очистки пылегазовых потоков в системах аспирации зависит от целого ряда факторов. Одним из наиболее существенных является скорость витания частиц  $u_p$ .

В [11] были получены экспериментально регрессионные зависимости скорости седиментации  $u_p$  от эквивалентного размера частиц и зависимость для критерия Архимеда  $Ar$  (плотности распределения) по результатам комплексного дисперсионного анализа частиц образцов пыли строительных материалов. В [12] было проведено определение значений факторов формы частиц  $\Psi$  для принятых к исследованию наиболее распространенных типов пыли в стройиндустрии. Функциональные соотношения  $Lu(Ar)$  частиц проб пыли позволили определять изменение значений факторов формы частиц  $\Psi$ , влияющих на скорость седиментации  $u_p$ , с использованием экстраполяции экспериментально полученных и имеющихся данных других исследователей.

В настоящей работе предпринята попытка совершенствования выходных данных результатов эксперимента с учетом [11, 12]. Было предложено существенно модифицировать и дополнить вид физических параметров выходных данных комплексного дисперсионного анализа с использованием критериев гидродинамики для оценки скорости седиментации  $u_p$  и эквивалентного размера частиц.

---

Экспериментально были получены выходные данные комплексного дисперсионного анализа частиц образцов пыли с использованием гидродинамических критериев Лященко  $Ly$  и Архимеда  $Ar$ . Для определения гидравлического размера частицы, вычисляемый косвенным образом по известной конечной скорости свободного падения, широко используется параметрический комплекс - критерия Лященко второго рода

$$Ly_{II} = \frac{\Psi}{Re} = \frac{\pi g (\rho_p - \rho_g)}{6 \nu^3 \rho_g} v \quad (1)$$

где  $\rho_p$  – плотность частиц пыли дисперсного материалов,  $кг/м^3$ ;

$\rho_g$  – плотность газа (воздуха),  $кг/м^3$ ;

$\nu$  – скорость газа (воздуха),  $м/с$ ;

$\Psi$  – коэффициент кинематической вязкости газа (воздуха).

Плотность и коэффициент кинематической вязкости воздуха зависит от температуры, и принимаются по справочным данным. При  $\rho_p \gg \rho_g$  для частиц пыли дисперсного стройматериала имеет место  $(\rho_p - \rho_g / \rho_g) \approx \rho_p$ .

$$Ly_{II} = \frac{\pi g \rho_p}{6 \nu^3} v \quad (2)$$

Критерий Лященко второго рода используется для отнесения частиц к тому или иному диапазону по крупности, что позволяет использовать ту или иную частную формулу для расчета конечной скорости седиментации  $u_p$ . Значения критерия Лященко второго рода целесообразнее использовать для определения размера частицы по известной скорости седиментации.

Серия экспериментов для определения скорости седиментации частиц и критерия Лященко второго рода с целью определения уточнения размера частицы для различных видов пыли стройматериалов выполнялась на лабораторной установке [13]. Комплексная зависимость интегральных функций плотности распределения чисел  $Ar$  и  $Ly$  частиц пробы пыли  $D(Ar)$ ,  $D(Ly)$ , для пыли стройматериалов (пыль неорганическая с содержанием

$\text{SiO}_2$  от 20 до 70 %) имеет вид, представленный на графике рис.1. При этом величина было предложено, для экспериментально измеряемой скорости седиментации (витания) частиц  $u_p$  и  $u_{p50}$  определять значения критериев Архимеда  $Ar$  и Лященко  $Ly$  (среднемедианные значения  $D_{50}(Ar)$   $D_{50}(Ly)$  для «совокупности» частиц пробы пыли). При этом интегральные функции плотности распределения критериев  $Ar$  и  $Ly$  частиц пробы пыли  $D(Ar)$ ,  $D(Ly)$ , позволяют определить более точно диапазон величины  $D_{50}$  для скорости седиментации (витания) частиц  $u_p$ ,  $u_{p50}$ , а также соответствующих им эквивалентные размеры частиц  $d_p$  и  $d_{p50}$ . При этом возможно и процедура решения обратной задачи для определения диапазон величин скорости седиментации (витания) частиц  $u_p$ ,  $u_{p50}$ ,  $d_p$  и  $d_{p50}$  для  $D_{50}(Ar)$ ,  $D_{50}(Ly)$  с использованием графиков  $D(Ar)$ ,  $D(Ly)$ .

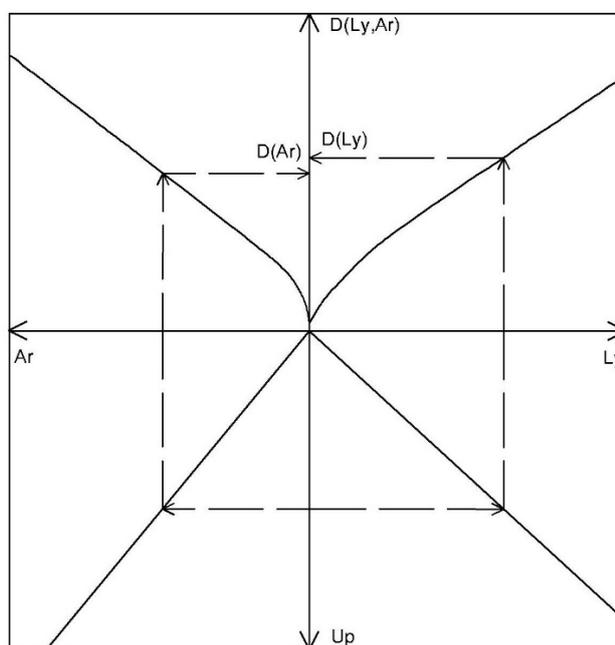


Рис. 1. – Комплексная зависимость интегральных функций плотности распределения чисел  $Ar$  и  $Ly$  для частиц пробы пыли  $D(Ar)$ ,  $D(Ly)$  для частиц пыли исследованных сыпучих стройматериалов, которые относятся к группе пылей неорганических с содержанием  $\text{SiO}_2$  от 20 до 70 %.

---

Статистическая обработка данных результатов экспериментов, выполненных на лабораторной установке [13], позволила получить регрессии для комплексной оценки интегральных функций плотности распределения чисел  $Ar$  и  $Ly$  частиц пробы пыли, величин  $D_{50}(Ar)$ ,  $D_{50}(Ly)$  пыли стройматериалов для частиц пыли исследованных сыпучих стройматериалов, классифицирующихся как пыль неорганическая с содержанием  $SiO_2$  от 20 до 70 % следующих видов

$$\begin{cases} D(Ar) = A_1 - B_1 \exp(-C_1 Ar) \\ D(Ly) = A_2 - B_2 \exp(-C_2 Ly) \\ D(Ly, Ar) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{Ly, Ar} \exp(-t^2/2) dt \end{cases} \quad (1)$$

Для упрощенных инженерных расчетов в проектах, при разработке конструкций пылеуловителей можно использовать аппроксимации, полученные в результате статистической обработки результатов эксперимента вида

$$\begin{cases} D(Ar) = (A_3 \lg^2(Ar) + B_3 \lg Ar + C_3) \\ D(Ly) = (A_4 \lg^2(Ly) + B_4 \lg Ly + C_4) \\ D(\Psi) = (A_5 (Ar)^2 + B_5 Ar + C_5) \end{cases} \quad (2)$$

где  $A_i$ ,  $B_i$  и  $C_i$  параметрические величины, принимающие постоянные значения для исследуемого вида пыли дисперсного стройматериала.

Расчета распределения значений фактора формы частиц  $\Psi$ , величина которого изменяется в зависимости, например, от критерия  $Ar$ , по соотношению (2) позволяет также уточнять скорости седиментации (витания) частиц для пыли дисперсных материалов в необходимых к уточнению диапазонах эквивалентных размеров частиц  $d_p$ .

В первом приближении в инженерных расчетах среднемедианные значения  $D_{50}(Ar)$ ,  $D_{50}(Ly)$  позволяют определить не только диапазон изменения, но и осредненные значения величин  $D_{50}(Ly, Ar)$  и среднемедианные значения скорости седиментации (витания) частиц  $u_{p50}$  «совокупности» частиц исследуемого образца пробы пыли по соотношениям вида

$$\begin{cases} D_{50}(Ly, Ar) = (D_{50}(Ly) + D_{50}(Ar))/2 \\ u_{p50} = (u_{p50}(Ly) + u_{p50}(Ar))/2 \\ d_{p50} = (d_{p50}(Ly) + d_{p50}(Ar))/2 \\ u_{p50} = \Psi_{50} u_p \end{cases} \quad (3)$$

Данный подход был использован для разработки новых пылеулавливающих устройств очистки пылевых выбросов систем аспирации стройиндустрии [3,4].

#### Выводы.

1. Интегральные функции плотности распределения критериев  $Ar$  и  $Ly$  частиц пробы пыли  $D(Ar)$ ,  $D(Ly)$  позволяют определить более точно диапазон величины  $D_{50}(Ar)$ ,  $D_{50}(Ly)$  для скорости седиментации частиц  $u_p$ ,  $u_{p50}$ , с эквивалентным им размерам частиц  $d_p$  и  $d_{p50}$ . Данный метод был использован для разработки пылеуловителей систем обеспыливания аспирации стройиндустрии, прошедших успешные опытно-промышленные испытания.

2. Скорость седиментации частиц является функцией ряда параметров в т.ч. совокупности значений фактора формы частиц пыли стройматериалов  $\Psi$ , критериев Архимеда, Лященко, которые позволяют получить регрессии определения гидравлической крупности частиц пыли, диапазонов изменения величин  $u_p$ ,  $d_p$  и их интегральных распределений  $D(Ar)$ ,  $D(Ly)$ ,  $D(\Psi)$ .

## Литература

1. Балтеренас, П. С. Обеспыливание воздуха на предприятиях строительных материалов . М.: Стройиздат, 1990. 180 с.
2. Азаров, В. Н. и др. Патент №2617473. Россия. Вихревой пылеуловитель. Заявка 2015112726 04.04.2015. Оpubл. 25.04.2017. Бюл. № 30.
3. Патент № 2575887, Россия. Устройство для очистки газов. Азаров, В. Н. [и др.]. Оpubл. 20.02.2016 Бюл. № 5.
4. Патент №161262, Россия. Аппарат с псевдооживленным слоем. Кошкарёв, С.А., Азаров, В. Н. [и др.]. Заявка №2015139314. Заявлено 15.09.2015. Оpubл. 10.04.2016. Бюлл.№10. 2016.
5. Николенко, М. А. и др. К определению фактических размеров частиц пыли выбросов стройиндустрии и строительства // Инженерный вестник Дона, 2015, №1(часть 2) URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2858](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2858).
6. K. I. Strelets, M. Petrochenko, A. Girgidov. //Appl. Mech. and Mater. 2015. V 725 Pp. 1363-1371.
7. Strelets K. I., Kitain M. B., Petrochenko M. V. Welding Spark Parameters Determination for Cyclone Removal Calculation // Advanced Materials Research. 2014. V. 941. Pp. 2098-2103.
8. Elsayed K. Powder Technology. 2015. V. 269 pp.409-424.
9. Yoshiyuki Endo<sup>1</sup> Da, Ren Chen David, Y.H.Pui. Powder Technology. 1998 V. 98 (3) Pp.241-249.
10. Allen T. Particle size measurement. Springer, 2013. URL: [books.google.ru/books?hl=ru&lr=&id=7dsFCAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR17&dq=analysis+of+variance+dispersed+dust+particle&ots=SkkjTLLsXk&sig=5NC9ebZSmyRUxn4VIHzn79pQE08&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.ru/books?hl=ru&lr=&id=7dsFCAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR17&dq=analysis+of+variance+dispersed+dust+particle&ots=SkkjTLLsXk&sig=5NC9ebZSmyRUxn4VIHzn79pQE08&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false).
11. Гасайниева, А.Г., Медведева, Е.Б., Ледяева, А.А., Милованов, А.С., Петрова, Н.Н., и др. К оценке результатов комплексного

дисперсионного анализа с использованием гидродинамических критериев в функции выхода для снижения проскока пыли в системах обеспыливания выбросов аспирации стройиндустрии // Инженерный вестник Дона, 2018, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5340.

12. Ледеяева, А.А., Милованов, А.С. и др. К оценке фактора формы частиц с использованием комплексного дисперсионного анализа для снижения проскока пыли выбросов в пылеулавливающих устройствах аспирации стройиндустрии // Инженерный вестник Дона. 2018. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive//n4y2018/5375.

13. Патент №156520, Россия, U1 МПК G01N 15/00. Устройство для определения дисперсного состава пыли. Азаров, В. Н. [и др.]. Заявка №2015124975/28. 24.06.2015. Заявлено 24.06.2015. Опубл. 2015.

### References

1. Balterenas, P. S. Obespylivanie vozduha na predpriyatijah stroitel'nyh materialov [Decreasing dust air in enterprises of building materials]. M.: Strojizdat, 1990. 180 p.

2. Patent № 2617473. Russia [Rossija]. Azarov, V. N. et al. Zajavka 2015112726. Zajavleno 04.04.2015. Publ. 25.04.2017. Bull. № 30.

3. Patent № 25758872617473. Russia [Rossija]. S.A., Azarov, V. N. et al. Publ. 20.02.2016 Bull. № 5.

4. Patent №. 161262. Russia [Rossija]. Koshkarev, S.A., Azarov, V. N. et al. Zajavka №2015139314

5. Nikolenko, M. A. et al. Inženernyj vestnik Dona (Rus). 2015, №1 (part 2) URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2858.

6. K. I. Strelets, M. Petrochenko, A. Girgidov. //Appl. Mech. and Mater. 2015. V. 725 Pp. 1363-1371.



7. Strelets K. I., Kitain M. B., Petrochenko M. V. Welding Spark Parameters Determination for Cyclone Removal Calculation // Advanced Materials Research. 2014. V. 941. Pp. 2098-2103.
8. Elsayed K. Powder Technology. 2015. V 269 Pp. 409-424.
9. Yoshiyuki Endo<sup>1</sup> Da, Ren Chen David, Y.H.Pui. Powder Technology. 1998 V 98 (3) Pp.241-249.
10. Allen T. Particle size measurement. Springer, 2013. URL:[books.google.ru/books?hl=ru&lr=&id=7dsFCAAQAQBAJ&oi=fnd&pg=PR17&dq=analysis+of+variance+dispersed+dust+particle&ots=SkkjTLIsXk&sig=5NC9ebZSmyRUxn4VIHzn79pQE08&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.ru/books?hl=ru&lr=&id=7dsFCAAQAQBAJ&oi=fnd&pg=PR17&dq=analysis+of+variance+dispersed+dust+particle&ots=SkkjTLIsXk&sig=5NC9ebZSmyRUxn4VIHzn79pQE08&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false).
11. Gasaynieva, A.G., Medvedeva, E.B., Ledyaeva, A.A., Milovanov, A.S., Petrova N.N. et al. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2018, №4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5340](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5340).
12. Ledyaeva, A.A., Milovanov, A.S. et al. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2018, №4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive//n4y2018/5375](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive//n4y2018/5375).
13. Patent №156520, Russia [Rossija]. U1 МПК G01N 15/00. Устройство длѣа опредѣленѣа дисперсного состава пыли [Device for determining the composition of particulate dust]. Azarov, V. N. et al. Заявка №2015124975/28. 24.06.2015. Заявлено 24.06.2015. Publ. 2015.