

## К оценке фактора формы частиц с использованием комплексного дисперсионного анализа для снижения проскока пыли выбросов в пылеулавливающих устройствах аспирации стройиндустрии

*С.А. Кошкарев, А.А. Ледяева, А.С. Милованов, А.В. Недожогина, Н.Н.*

*Петрова, Н.Н. Миличева, К.С. Кошкарев*

*Волгоградский государственный технический университет,  
Волгоград*

**Аннотация:** Статья посвящена подходу к разработке высокоэффективных пылеуловителей для систем аспирации стройиндустрии. В статье были экспериментально определены величины факторов формы частиц, наиболее характерных для стройиндустрии с использованием результатов дисперсионного анализа. В функции выходных данных анализа использовались гидродинамические критерии, на основе которых были получены значения факторов формы частиц исследуемых пылей. Были получены регрессии для факторов формы частиц как функции гидродинамических критериев. Было предложена зависимость для уточнения скоростей седиментации - витания частиц с учетом влияния факторов формы частиц для исследованных проб пыли. Получена регрессия для инженерного расчета значения фактора формы частиц в зависимости от гидродинамических критериев для пыли сыпучих стройматериалов. Это позволило получить более надежные результаты в определении скоростей седиментации-витания частиц при использовании комплексного дисперсионного анализа частиц. Результаты исследований позволяют разрабатывать устройства очистки выбросов систем аспирации стройиндустрии, обеспечивающих значительное снижение проскока пыли в системах обеспыливания, что является эффективным методом повышения экологической безопасности.

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

Скорость витания частиц является важным параметром, имеющим как прикладное техническое, так и фундаментальное значение. Ее значение в значительной степени определяет степень проскока твердых частиц при сепарации пыли, например, в циклонах и инерционных аппаратах ВЗП-ВИП (встречно закрученных потоках) различных модификаций [1]. Это также значимо при выборе, проектировании и расчете различных пылеулавливающих устройств инерционного типа [2-4] и аппаратов с инерционно – фильтрующим механизмом очистки выбросов систем

---

аспирации во взвешенно - псевдооживленном слое дисперсных материалов [5-8] систем аспирации. Расчет и проектирование пылеуловителей выполняется с учетом методологии исследования комплексного дисперсионного анализа частиц пыли [4, 5, 7].

Вопросам дисперсионного анализа частиц пыли (распределения по эквивалентным размерам, скорости седиментации частиц) посвящено значительное количество работ в рамках настоящей статьи, например, [4,5, 9-12], и провести полный обзор и анализ не представляется возможным. Обобщенное представление результатов экспериментальных теоретических исследований дисперсионного анализа и взаимосвязи скорости седиментации (витания), эквивалентных размеров и факторов формы частиц  $\Psi$  представлено также в фундаментальных работах [13 -15].

Оценка скорости седиментации – витания частиц  $u_p^v$  производилась при комплексном исследовании гидродинамических закономерностей пыли и дисперсионного анализа на установке [9]. В первом приближении скорости витания частиц  $u_p^v$  близки в своих значениях к скорости седиментации частиц  $u_p$ . При решении технических задач проектирования пылеулавливающих устройств с незначительной степенью проскока частиц пыли требуется экспериментальное определение влияющих на скорости седиментации (витания) эквивалентных размеров, а также численных значений факторов формы частиц  $\Psi$ .

В настоящей работе выполнено экспериментальное определение значений факторов формы частиц  $\Psi$  для некоторых видов пыли, характерных для стройиндустрии, с использованием данных результатов комплексного дисперсионного анализа с использованием в функции выхода гидродинамических критериев.

Были получена экспериментальная зависимость критерия Лященко  $Lu$  от числа Архимеда  $Ar$ , являющегося в функции измеряемой скорости седиментации частиц  $u_p$ . Зависимость критериев  $Lu$  ( $Ar$ ) частиц пробы пыли позволяют определить изменение значений факторов формы частиц  $\Psi$  в сравнении с имеющимися данными других исследователей, например [15].

Лященко было предложено использовать некоторые безразмерные параметрические комплексы, которые представляют собой модификации критерия  $Lu$ . Модифицированный критерий первого типа  $Lu_1$  для определения эквивалентного диаметра частиц  $d_p$  по известной скорости седиментации  $u_p$  имеет вид

$$Lu_1 = Re^2 \Psi = \frac{\pi g d_p^3 (\rho_p - \rho_g)}{6 \nu^2 \rho_g} \quad (1)$$

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

$\rho_g$  – плотность газа (воздуха), кг/м<sup>3</sup>;

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

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

Зависимость критерия Лященко  $Lu$  от числа Архимеда  $Ar$  для частиц пыли исследованных сыпучих стройматериалов, классифицирующихся как пыль неорганическая с содержанием  $SiO_2$  от 20 до 70 %, имеет вид, представленный на графике рис.1. Функциональная зависимость критерия Лященко  $Lu_1$ , являющаяся графическим представлением выражения (1) для определения скорости седиментации, представлена на рис. 2.

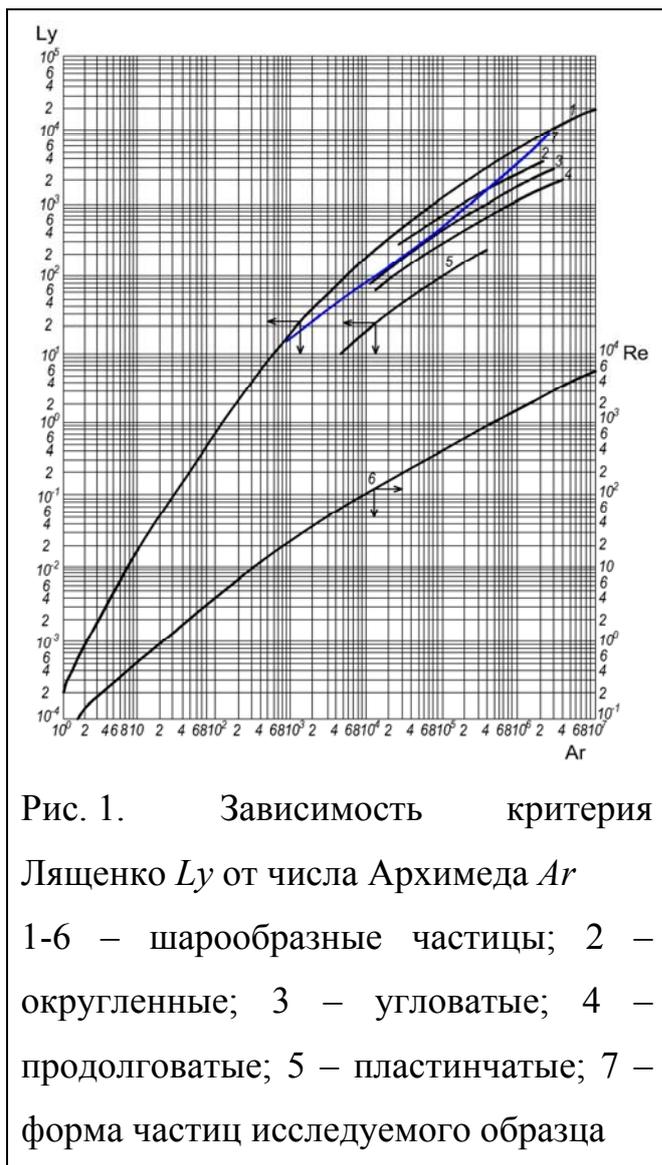


Рис. 1. Зависимость критерия Лященко  $Lu$  от числа Архимеда  $Ar$   
 1-6 – шарообразные частицы; 2 – округленные; 3 – угловатые; 4 – продолговатые; 5 – пластинчатые; 7 – форма частиц исследуемого образца

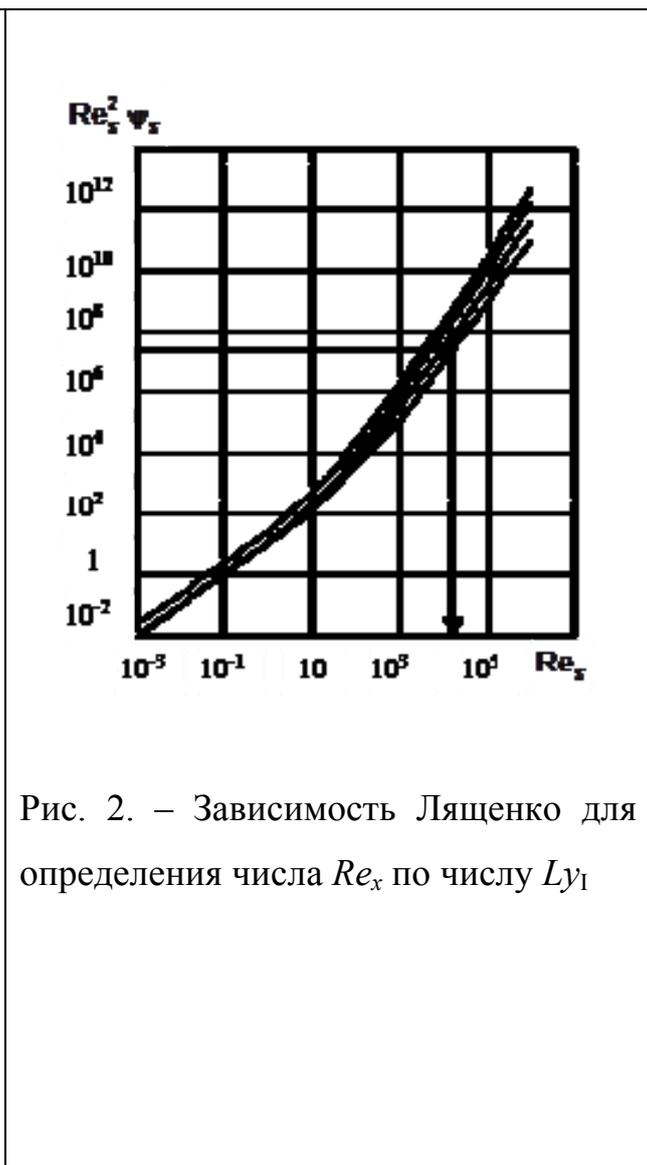


Рис. 2. – Зависимость Лященко для определения числа  $Re_x$  по числу  $Lu$

Результаты исследования показали (рис. 1.), что значение фактора формы частиц  $\Psi$  изменяется как от вида стройматериалов, места отбора пробы, так и в зависимости от эквивалентного размера частиц. Сравнение с имеющимися данными других исследователей для частиц условно эталонных форм, [15], приведенными на рис. 1, показало, что для частиц диаметром  $d_p$  от 50 до 1 мкм - значение фактора находится в диапазоне  $0,82 \leq \Psi \leq 0,94$ . Получена регрессия для инженерного расчета значения фактора формы частиц  $\Psi$  в зависимости от числа Архимеда  $Ar$  для пыли сыпучих стройматериалов, имеющая вид

$$\Psi(Ar) = (A_1 \lg^2(Ar) + B_1 \lg Ar + C_1) \quad (2)$$

Определение уточненной скорости частиц  $u_p^r$  из числа Рейнольдса  $Re_x = (u_p^r d_p / \nu)$  производится с использованием зависимости Лященко рис. 2. Для частиц произвольной формы скорость седиментации отличается от скорости сферических частиц

$$u_p^r = \Psi u_p \quad (3)$$

Данный метод оценки уточненных скоростей седиментации частиц  $u_p^r$  с учетом влияния фактора формы был использован для разработки новых пылеуловителей [1, 6], устанавливаемых в системах обеспыливания выбросов аспирационных систем стройиндустрии.

**Выводы.**

1. Предложен способ оценки скорости седиментации частиц с учетом влияния фактора формы частиц  $\Psi$ , который был использован для разработки новых пылеуловителей. Данные устройства прошли успешную апробацию испытаниями в промышленности.

2. Получены регрессии для расчета значения фактора формы частиц  $\Psi$  в зависимости от числа Архимеда  $Ar$  для исследованных видов сыпучих стройматериалов.

### **Литература**

1. Кошкарев, С.А. и др. Патент №2617473. Россия. Вихревой пылеуловитель. Заявка 2015112726 04.04.2015. Опубл. 25.04.2017. Бюл. № 30.

2. Valery N. Azarov, Denis V. Lukanin, Dmitri P. Borovkov, Awadh M. Redhwan. Experimental study of secondary swirling flow influence on flows structure at separation chamber inlet of dust collector with counter swirling flows //International review of mechanical engineering, 2014. Vol.8, №5. Pp.851-856.

---

3. 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.

4. Азаров, В. Н., Кошкарев, С. А., Николенко, М. А. К определению фактических размеров частиц пыли выбросов стройиндустрии и строительства // Инженерный вестник Дона, 2015, №1, ч.2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2858.

5. Кошкарев, С.А. Димитренко, М.В., Ерохин, Д.А., Тагаева, А.О., Слободчкова, А.Д., Кошкарев, К.С. Особенности применения комплексного дисперсионного анализа для повышения эффективности систем обеспыливания выбросов аспирации стройиндустрии // Инженерный вестник Дона, 2016, №4. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3799.

6. Патент №161262, Россия. Аппарат с псевдооживленным слоем. Кошкарев, С.А., Азаров, В. Н. [и др.]. Заявка №2015139314. Заявлено 15.09.2015. Оpubл. 10.04.2016. Бюлл.№10. 2016.

7. Кошкарев, С.А. Повышение экологической безопасности предприятий стройиндустрии путем снижения проскока пыли в системах обеспыливания с пылеуловителями псевдооживленного слоя дисперсного материала // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2017. № 50 (69). С. 252-260.

8. Koshkarev S., Azarov V., Azarov D. The decreasing dust emissions of aspiration schemes applying a fluidized granular particulate material bed separator at the building construction factories// Procedia Engineering. 2016. V. 165. Pp. 1070-1079.

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

---



10. N. Sugimoto, CH Lee. Characteristics of dust aerosols inferred from lidar depolarization measurements at two wavelengths. *Applied optics*, 2006. DOI: 10.1364/AO.45.007468. URL: [researchgate.net/publication/6811749](https://www.researchgate.net/publication/6811749).
11. Yoshiyuki Endo<sup>1</sup> Da, Ren Chen David, Y.H.Pui. Effects of particle polydispersity and shape factor during dust cake loading on air filters. *Powder Technology*. Vol. 98, (3), 1998, Pp 241-249.
12. N. Kaaden, A. Massling, A. Schladitz, T. Müller, K. Kandler, et al. State of mixing, shape factor, number size distribution, and hygroscopic growth of the Saharan anthropogenic and mineral dust aerosol at Tinfou, Morocco, *Tellus B. Chemical and Physical Meteorology*, 200961:1, Pp. 51-63, DOI: 10.1111/j.1600-0889.2008.00388.x
13. Allen T. Particle size measurement. Springer, 2013. URL: [books.google.ru/books?hl=ru&lr=&id=7dsFCAAQBAJ&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=7dsFCAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR17&dq=analysis+of+variance+dispersed+dust+particle&ots=SkkjTLlsXk&sig=5NC9ebZSmyRUxn4VIHzn79pQE08&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false).
14. Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles. WC Hinds. A Wiley Interscience Publication. John Wiley & Sons, Inc. 2d Ed. 2012. 259 p.
15. Тодес О.М., Аэров М.Э. Аппараты с зернистым кипящим слоем. М.: Химия, 1973. 273 с.

### References

1. Patent №2617473, Russia [Rossija]. Koshkarev, S.A., Azarov, V. N. et al. Zayavka №2015112726. Zayavleno 04.04.2015. Publ. 25.04.2017. Bull.№ 30. 2017.
  2. Valery N. Azarov, Denis V. Lukanin, Dmitri P. Borovkov, Awadh M. Redhwan. *International review of mechanical engineering*, 2014. Vol.8, №5. Pp.851-856.
-

3. Strelets K. I., Kitain M. B., Petrochenko M. V. *Advanced Materials Research*. 2014. V. 941. Pp. 2098-2103.
  4. Azarov, V. N., Koshkarev, S. A., Nikolenko, M. A. *Inzhenernyy vestnik Dona (Rus)*, 2015, №1, p.2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2858](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2858).
  5. Koshkarev, S.A. Dimitrenko, M.V., Erohin, D.A., Tagaeva, A.O., Slobodchkova, A.D., Koshkarev, K.S. *Inzhenernyy vestnik Dona (Rus)*, 2016, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3799](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3799).
  6. Patent №. 161262. Russia. *Apparat s psevdoozhizhennym sloem [Fluid Bed Apparatus]*. Koshkarev, S.A., Azarov, V. N. et al. *Zajavka №2015139314*. *Zajavleno 15.09.2015. Publ.10.04.2016. Bull.№10. 2016*.
  7. Koshkarev, S.A. *Vestnik VolgGASU*. 2017. № 50 (69). Pp. 252-260.
  8. Koshkarev S., Azarov V., Azarov D. *Procedia Engineering*. 2016. V. 165. Pp. 1070-1079.
  9. Patent №156520, Rossija. U1 MIIK G01N 15/00. *Ustrojstvo dlja opredelenija dispersnogo sostava pyli [Device for determining the composition of particulate dust]*. Koshkarev, S.A., Azarov, V. N. et al. *Zajavka №2015124975/28*. 24.06.2015. *Zajavleno 24.06.2015. Publ. 2015*.
  10. N. Sugimoto, CH Lee. *Characteristics of dust aerosols inferred from lidar depolarization measurements at two wavelengths*. *Applied optics*, 2006. DOI: 10.1364/AO.45.007468. URL: [researchgate.net/publication/6811749](http://researchgate.net/publication/6811749).
  11. Yoshiyuki Endo, Da, Ren Chen David, Y.H.Pui. *Effects of particle polydispersity and shape factor during dust cake loading on air filters*. *Powder Technology*. Vol. 98, (3), 1998, Pp 241-249.
  12. N. Kaaden, A. Massling, A. Schladitz, T. Müller, K. Kandler, et al. *State of mixing, shape factor, number size distribution, and hygroscopic growth of the Saharan anthropogenic and mineral dust aerosol at Tinfou, Morocco*, *Tellus B. Chemical and Physical Meteorology*, 200961:1, Pp. 51-63, DOI: 10.1111/j.1600-0889.2008.00388.x
-



13. 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=SkkjTLIsXk&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=SkkjTLIsXk&sig=5NC9ebZSmyRUxn4VIHzn79pQE08&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false).

14. Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles. WC Hinds. A Wiley Interscience Publication. John Wiley & Sons, Inc. 2d Ed. 2012. 259 p.

15. Todes O.M., Ajerov M.Je. Apparaty s zernistym kipjashhim sloem. M.: Himija, 1973. 273 p.