

DOI: 10.12737/article\_5c1c995f0b24c9.85544603

<sup>1</sup>\*Семиненко А.С., <sup>2</sup>Уляшева В.М.<sup>1</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет  
Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4

\*E-mail: seminenko.as@bstu.ru

## ПОВЕДЕНИЕ ЧАСТИЦ ПОРОШКООБРАЗНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ПНЕВМОТРАНСПОРТНОЙ ЗАГРУЗКЕ

**Аннотация.** Эффективность и энергоёмкость работы систем аспирации зависят от эксплуатационных режимов оборудования, устанавливаемых в соответствии с характеристиками аспирационного потока, количественного и качественного состава пылевых частиц. Поэтому при проектировании энергоэффективных систем обеспыливания необходимо учитывать изменяющиеся траектории в полости технологических емкостей. Прогнозировать поведение частиц, определяя их оседание, либо увлечение аспирационным потоком. В работе приведены расчетные уравнения для построения траекторий пылевых частиц в зависимости от геометрических характеристик бункера и загрузочного устройства, а также физических параметров пневмотранспортного потока. Для точного учета поведения частиц в поле скоростей пневмотранспортного потока учтены, как продольная, окружная составляющие скорости, так и поперечная. В качестве исходных уравнений, приняты классические решения автотельных движений в турбулентных струях, преобразованные в систему дифференциальных уравнений в обычных производных. Показан листинг программы в универсальной математической среде Maple и графический результат расчета для частиц различной крупности: 5, 10 и 15 мкм при движении в условиях не полной вверной струи, формируемой в узле загрузки. Определена рациональность настроек загрузочного устройства, обеспечивающих траектории движения пневмотранспортного потока.

**Ключевые слова:** обеспыливание, энергоэффективность, траектория пылевых частиц, моделирование, проектирование.

**Введение.** Для снижения пылевыделения в рабочую зону от мест перегрузки порошкообразных материалов технологические емкости оснащаются системой обеспыливания (аспирации) [1, 2]. Эффективность и энергоёмкость работы системы [3, 4] зависит от корректно подобранного, в соответствии с характеристиками аспирационного потока, состава оборудования [5, 6] и его эксплуатационного режима [7]. Пневмотранспортная загрузка материала характеризуется повышенной концентрацией пылевых частиц в емкости [8, 9]. Это объясняется значительным увеличением скорости движения и взаимодействием загружаемого потока и складированного (уложенного) материала [10, 11]. Поэтому при проектировании энергоэффективных систем обеспыливания необходимо учитывать изменяющиеся траектории пылевых частиц в полости технологических емкостей.

**Методология.** Для точного учета поведения частиц в поле скоростей пневмотранспортного потока необходимо учитывать, как продольную, окружную составляющие скорости, так и поперечную. Несмотря на ее малость, приводит к изменению траектории по горизонтали. Потому для задания поля скоростей, в качестве исходных уравнений, приняты классические решения автотельных движений в турбулентных струях

[12], преобразованные в систему дифференциальных уравнений в обычных производных. С последующим их решением универсальным математическим пакетом Maple [13].

**Основная часть.** Моделируем поведение частиц пневмотранспортной струе, поступающей в бункер через вертикальный канал диаметром  $d_0$ . Для интегрирования исходных уравнений динамики твердых частиц [14], используем поле скоростей, описываемое системой уравнений [15]. Перейдем к безразмерной форме этих уравнений, используя в качестве характерного геометрического размера диаметр бункера  $D_1$ .

Тогда в соответствии с [12, 13] функции безразмерных составляющих скорости примут вид:

$$\frac{u_x}{u_\infty} = \frac{u_x}{u_0} = \frac{A}{D_1 u_0 x_1} \cdot \frac{F'}{\eta}; \quad (1)$$

$$\frac{u_y}{u_\infty} = \frac{u_y}{u_0} = \frac{A}{D_1 u_0 x_1} \cdot \left( F' - \frac{F}{\eta} \right); \quad (2)$$

$$\frac{u_\varphi}{u_\infty} = \frac{u_\varphi}{u_0} = \frac{C}{D_1^2 u_0 x_1^2} \cdot \Phi; \quad (3)$$

$\eta = \frac{x_2}{a \cdot x_1}$ ; где  $x_1$  и  $x_2$  – безразмерные координаты траектории пылевой частицы. Сгруппируем коэффициенты:

$$A_1 = \frac{A}{D_1 u_0}; A_2 = \frac{A \bar{a}}{D_1 u_0}; A_3 = \frac{C}{D_1^2 u_0}; \quad (4)$$

где  $u_0$  – начальная скорость потока; А, С – постоянные автомодельности.

С учетом этого систему (1)-(3) перепишем в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{u_x}{u_0} &= \frac{A_1}{x_1} \cdot \frac{1}{z_1^2}; \\ \frac{u_y}{u_0} &= \frac{A_2}{x_1} \cdot \frac{\eta}{z_1} \left( \frac{1}{z_1} - 0,5 \right); \\ \frac{u_\varphi}{u_0} &= \frac{A_3}{x_1^2} \cdot \frac{\eta}{z_1^2} \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

а система уравнений, характеризующая поведение частиц примет вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_4; \quad \dot{x}_2 = x_5; \quad \dot{x}_3 = x_6; \\ \dot{x}_4 &= Fr + \frac{1}{St} \left( \frac{u_x}{u_\infty} - x_4 \right); \\ \dot{x}_5 &= x_2 x_6^2 + \frac{1}{St} \left( \frac{u_y}{u_\infty} - x_5 \right); \\ \dot{x}_6 &= \frac{1}{x_2} \left( -2 x_2 x_6 + \frac{1}{St} \left( \frac{u_\varphi}{u_\infty} - x_2 x_6 \right) \right) \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

где  $Fr$  – критерий Фруда,  $St$  – критерий Стокса, учитывающие действие силы тяжести и аэродинамических сил соответственно.

**Результат.** По полученным зависимостям составлена расчетная программа для универсального математического пакета Maple. В качестве исходных данных приняты конструктивные характеристики бункера и узла загрузки, физические характеристики потока (рис. 1. а).

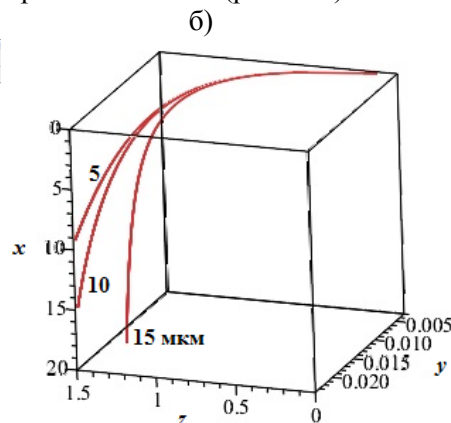
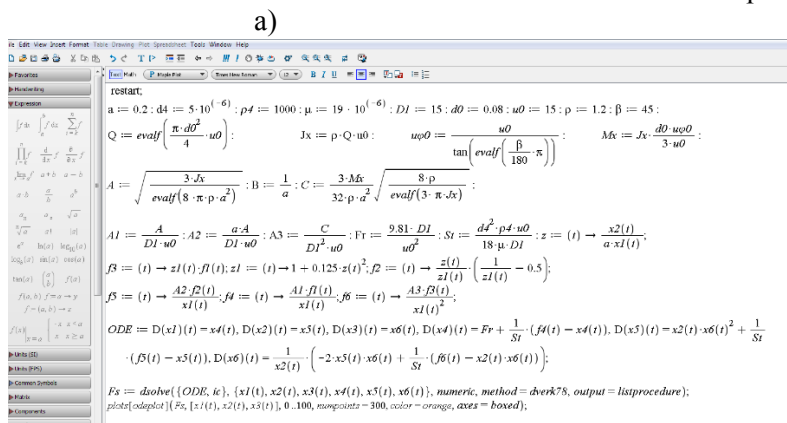


Рис.1. а) листинг расчетной программы; б) графический результат расчета

**Выводы.** Приведенная методика расчета позволяет определять траекторию расчета пылевых частиц, необходимую для прогнозирования концентрации пылевых частиц в аспирационном потоке. На рисунке 1 б приведен результат графического расчета в среде Maple для твердых частиц различной крупности: 5, 10 и 15 мкм при движении в условиях не полной веерной струи, формируемой в узле загрузки. Траектории соответствуют рациональным настройкам загрузочного устройства, обеспечивающего отклонение потока от строго вертикального падения, при этом направление движения частиц рассматриваемых диаметров на некотором удалении от узла загрузки оседают в полости бункера.

**Источник финансирования.** Грант Российского научного фонда (проект № 18-79-10025).

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Обеспыливающая вентиляция. Монография (том 2). Монография под общ. ред.

В.А. Минко. Белгород: Изд-во БГТУ. 2010. 565 С.  
 2. Азаров В.Н., Горбунова М.Е. Обследование систем аспирации. Волгоград: Волгоградский гос. ун-т, 2005 (Волгоград: Тип. Изд-ва "Станица-2"). 99 с.  
 3. Логачёв И.Н., Логачёв К.И., Аверкова О.А. Энергосбережение в аспирации: теоретические предпосылки и рекомендации. М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2013. 504 с  
 4. Logachev I.N., Logachev K.I. Industrial air quality and ventilation: controlling dust emissions. Boca Raton: CRC Press, 2014. 417 с.  
 5. Посохин В.Н. Аэродинамика вентиляции. М.: АВОК-ПРЕСС, 2008. 205 с.  
 6. Азаров В.Н., Лупиногин В.В., Милованов А.С. Исследование дисперсного состава и аэродинамических характеристик пыли внутри складских помещений / Материалы Всероссийская междисциплинарная научная конференция.

НАУКА И ПРАКТИКА – 2018 // Изд-во Астраханский государственный технический университет (Астрахань), 2018.

7. Logachev I.N., Logachev K.I., Averkova O.A. An intercomponent heat transfer in a gravitational flow movements of particles in an inclined chute. Coupled problems 2015 - Proceedings of the 6th International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering. 2015. Vol. 6. Pp. 1291–1302.

8. Chenchen Fang, Jianliang Xu, Hui Zhao, Weifeng Li, Haifeng Liu. Experimental investigation on particle entrainment behaviors near a nozzle in gas–particle coaxial jets // Powder Technology. 2015. Vol. 286. Pp. 55–63.

9. Семиненко А.С. Снижение пылеобразования при пневмотранспортной загрузке порошкообразных материалов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. № 4. С. 56–61.

10. Li Xiaochuan, Wang Qili, Liu Qi, Hu Yafei. Developments in studies of air entrained by falling bulk materials // Powder Technology. 2016. Vol. 291. Pp. 159–169.

11. Семиненко А.С., Логачев И.Н. Снижение пылеобразования при загрузке бункеров сыпучими материалами // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2006. № 14. С. 251–254.

12. Вулис Л.А., Кашкаров В.П. Теория струй вязкой жидкости. М.: Изд-во "Наука", 1965. 432 с.

13. Позин Г.М., Уляшева В.М., Киборт И.Д. К вопросу применения моделей турбулентности при численном моделировании вентиляционных процессов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013. № 10 (658). С. 48–56.

14. Logachev I.N., Logachev K.I., Uvarov V.A., Seminenko A.S., Goltsov A.B., Kireev V.M. Velocity field for fan weakly swirled jet of loading spouts for fine materials // International Journal of Pharmacy & Technology. 2016. Т. 8. №4. С. 24880–24888.

15. Logachev I.N., Logachev K.I., Seminenko A.S. Basic equations of particle dynamics in silo type hoppers during pneumatic charging // Modern scientific research and their practical application. 2014. Vol. J11404. Pp. 17–24.

#### Информация об авторах

**Семиненко Артем Сергеевич**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail abgolcov@gmail.com, seminenko.as@bstu.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Уляшева Вера Михайловна**, доктор технических наук, профессора кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4

Поступила в сентябре 2018 г.

© Семиненко А.С., Уляшева В.М., 2018

<sup>1,\*</sup>**Seminenko A.S.**, <sup>2</sup>**Uliashova V.M.**

<sup>1</sup>Belgorod State Technological University n. a. V.G. Shukhov  
Russia, 308012, Belgorod, St. Kostyukova, 46

<sup>2</sup>Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPSUACE)  
Russia, 190005, St. Petersburg, 2-ya Krasnoarmeiskaya St. 4

\* E-mail: seminenko.as@bstu.ru

## BEHAVIOR OF PARTICLES OF POWDERED MATERIAL AT PNEUMATIC TRANSPORT LOADING

**Abstract.** The efficiency and energy intensity of the aspiration systems depend on the operating conditions of the equipment, installed in accordance with characteristics of the aspiration flow, the quantitative and qualitative composition of dust particles. Therefore, when designing energy-efficient dedusting systems, it is necessary to take into account the changing trajectories in the cavity of technological tanks. To predict the behavior of particles, determining its sedimentation, or increase by aspiration flow. The paper presents equations for constructing the trajectories of dust particles depending on the geometric characteristics of the bunker and the loading device, as well as the physical parameters of the pneumatic transport flow. The longitudinal, circumferential and transverse velocity components are considered in order to accurately account the behavior of particles in the velocity field of a pneumatic conveying flow. As the initial equations, classical solutions of self-similar motions in turbulent jets are adopted and transformed into a system of differential equations in ordinary derivatives. The program listing is shown in the universal mathematical environment Maple and the

*graphical result of the calculation for particles of various sizes: 5, 10 and 15  $\mu\text{m}$  when moving under conditions of an incomplete fan jet formed in the loading unit. The rationality of the loading device settings is determined, providing the trajectory of the pneumatic transport flow.*

**Keywords:** *dedusting, energy efficiency, the trajectory of dust particles, modeling, design.*

## REFERENCES

1. Vacuum ventilation. Monograph (Volume 2). The monograph is a summary. Editor Vice Admiral Minko. Belgorod: BSTU publishing house, 2010, 565 p.
2. Azarov V.N., Gorbunova M.E. Examination of aspiration systems. Volgograd: Volgograd State Technological University, 2005 (Volgograd: type. Publishing House "Stanitsa-2"). 99 p.
3. Logachev I.N., Logachev K.I., Averkova O.A. Energy Saving in Aspiration: Theoretical Foundations and Recommendations. M. - Izhevsk: SIC "Regular and chaotic dynamics", 2013. 504 p.
4. Logachev I.N., Logachev K.I. Industrial air quality and ventilation: control of dust emissions. Boca Raton: CRC Press, 2014, 417 p.
5. Posokhin V.N. Aerodynamics of ventilation. Moscow: AVOK-PRESS, 2008. 205 p.
6. Azarov V.N., Lupinogin V.V., Miloanov A.S. Study of the dispersed composition and aerodynamic characteristics of dust inside warehouses. Materials of the All-Russian Interdisciplinary Scientific Conference. SCIENCE AND PRACTICE-KA – 2018. Publisher: Astrakhan State Technical University (Astrakhan), 2018
7. Logachev I.N., Logachev K.I., Averkova O.A. An intercomponent heat transfer in a gravitational flow movements of particles in an inclined chute. Coupled problems 2015 - Proceedings of the 6th International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering, 2015, vol. 6, pp. 1291–1302.
8. Chenchen Fang, Jianliang Xu, Hui Zhao, Weifeng Li, Haifeng Liu. Experimental investigation on particle entrainment behaviors near a nozzle in gas–particle coaxial jets. Powder Technology, 2015, vol. 286, pp. 55–63.
9. Seminenko A.S. Reduction of dust formation during pneumatic transport of powdered materials. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2018, no. 4, pp. 56–61.
10. Li Xiaochuan, Wang Qili, Liu Qi, Hu Yafei. Developments in studies of air and gas industry. Powder Technology, 2016, vol. 291. pp. 159–169.
11. Seminenko A.S., Logachev I.N. Reduction of dust formation when loading bunkers with loose materials. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2006, no. 14, pp. 251–254.
12. Vulis L.A., Kashkarov V.P. Theory of viscous fluid jets. M.: Nauka Publishing House, 1965, 432 p.
13. Pozin G.M., Ulyasheva V.M., Kibort I.D. On the use of turbulence models in the numerical simulation of ventilation processes. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniyakh. Building. 2013, no. 10 (658), pp. 48–56.
14. Logachev I.N., Logachev K.I., Uvarov V.A., Seminenko A.S., Goltsov A.B., Kireev V.M. Velocity field for fan weakly swirled jet of loading spouts for fine materials. International Journal of Pharmacy & Technology, 2016, vol. 8, no. 4, pp. 24880–24888.
15. Logachev I.N., Logachev K.I., Seminenko A.S. Basic equations of particle dynamics in silo type hoppers during pneumatic charging. Modern scientific research and their practical application, 2014, vol. J11404, pp. 17–24.

### Information about the author

**Semenenko, Artem S.** PhD, Senior lecturer. E-mail [semenenko.as@gmail.com](mailto:semenenko.as@gmail.com). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Uliasheva, Vera M.** DSc, Professor. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPSUACE). Russia, 190005, St. Petersburg, 2-ya Krasnoarmeiskaya St. 4.

*Received in September 2018*

### Для цитирования:

Семиненко А.С., Уляшева В.М. Поведение частиц порошкообразного материала при пневмотранспортной загрузке // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №12. С. 63–66. DOI: 10.12737/article\_5c1c995f0b24c9.85544603

### For citation:

Semenenko A.S., Uliasheva V.M. Behavior of particles of powdered material at pneumatic transport loading. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2018, no. 12, pp. 63–66. DOI: 10.12737/article\_5c1c995f0b24c9.85544603