

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЖЕКТИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ПОТОКА ПОЛИФРАКЦИОННОГО СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА

popov.en@bstu.ru

Данная работа направлена на подтверждение адекватности выдвинутого автором вероятностно-статистического подхода к определению коэффициента аэродинамического сопротивления частиц в потоке свободно падающего полифракционного материала. Коэффициент аэродинамического сопротивления частиц в потоке падающего материала определяется через вычисление вероятности нахождения частиц вне аэродинамических теней соседних частиц. Лабораторный эксперимент проводился на предложенных экспериментальных пробах сыпучего материала, имеющих разный гранулометрический состав, но одинаковый средний диаметр частиц. Описаны конструкция лабораторной экспериментальной установки, позволяющей определить расход воздуха, эжектируемого потоком полифракционного материала. Количество эжектируемого экспериментальными пробами воздуха зависит от их гранулометрического состава, что подтверждает недостаточность описания свойств сыпучего материала одной величиной среднего диаметра. Приведенное сравнение результатов аналитических вычислений с экспериментальными данными говорит о достоверности и адекватности расчётных значений.

**Ключевые слова:** аспирация бункеров, загрузка бункеров, полидисперсный материал, полифракционный материал, эжектирование воздуха, динамика частиц, аэродинамика, обеспыливающая вентиляция.

**Введение.** Рассмотрим аэродинамическое взаимодействие потока падающих полидисперсных частиц с воздухом. В предложенном ранее вероятностно-статистическом подходе [1, 2] было выдвинуто предположение, что коэффициент лобового сопротивления частиц в полифракционном материале пропорционален вероятности активного аэродинамического взаимодействия этих частиц с воздухом.

Аэродинамическое взаимодействие отдельных частиц в струе падающего материала и эжектируемого ими воздуха, как известно [3–5], определяется суммой аэродинамических сил всех частиц этого потока в единице объема  $dV = S \cdot dx$ :

$$d((1-\beta) \cdot \rho \cdot u \cdot S) \cdot u = \left( \sum_{i=1}^N R_i \cdot c_i \right) \cdot S \cdot dx, \quad (1)$$

где  $\beta$  – объемная концентрация частиц;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $u$  – скорость эжектируемого воздуха, м/с;  $S$  – площадь поперечного сечения струи, м<sup>2</sup>;  $c_i$  – счетная концентрация этих частиц в элементарном объеме струи  $S \cdot dx$ , 1/м<sup>3</sup>;  $R_i$  – аэродинамическая сила динамического взаимодействия одиночной частицы диаметром  $d_i$ , определяемая с помощью коэффициента аэродинамического сопротивления:

$$R_i = \psi_i \cdot F_{mi} \cdot \rho \cdot \frac{(v_i - u)^2}{2}, \quad (2)$$

где  $\psi_i$  – коэффициент лобового сопротивления частицы диаметром  $d_i$  в потоке материала.

Основной трудностью при определении коэффициента аэродинамического сопротивления частицы, находящейся в потоке падающего материала, является учет взаимного влияния стесненности потока, а также влияние частиц друг на друга. Это влияние зависит от множества факторов и учитывается фактическим коэффициентом сопротивления  $\psi^*$ , который определяется экспериментально для материалов разного типа, и описывается эмпирическими зависимостями, которые для острозернистых частиц эквивалентным диаметром  $d_{\varphi}$  принимают вид [6]:

$$\psi^* = \psi_0 \cdot e^{-1,8 \cdot \sqrt{\beta \cdot 10^3} / d_{\varphi}} \quad (3)$$

где  $\psi_0$  – коэффициент лобового сопротивления одиночной (свободной) частицы диаметром  $d_i$ .

В предложенном вероятностно-статистическом методе [2] коэффициент активного аэродинамического сопротивления частиц (находящихся вне аэродинамических теней соседних частиц) с диаметром  $d_i$  можно определить по формуле:

$$\psi_i = \left( 1 - K \cdot \frac{\sum \beta_{(d_i)}}{1 - \beta} \right) \cdot \psi_0 \quad (4)$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности, отношение объема аэродинамической тени частицы к объему самой частицы.

Для подтверждения выдвинутых предположений необходимо сравнение их с опытными данными, что и осуществлено с помощью предлагаемого экспериментального стенда.

**Основная часть.** Непосредственно измерить скорость эжектируемого частицами воздуха в потоке падающего материала достаточно сложно. В связи с этим определим расход воздуха, который движется в струе материала косвенным способом, через камеру статического давления, детально описанным Ze

Qin Liu [7]. Однако, при исследовании относительно крупнофракционных материалов, способ потребовал ряд модификаций.

Экспериментальный стенд (рис. 1) состоит из верхнего бункера 1 с открывающейся диафрагмой 2, нижнего бункера 3 размерами 1×1 м, который выполняет функцию камеры статического давления, вентилятора 9 с регулирующим шибером 8.

В качестве материала выбран гранитный щебень. Так как материал хорошо сыпучий, то изменением расхода по мере опустошения верхнего бункера можно пренебречь.

Подготовленные образцы материала с заданным гранулометрическим составом из верхнего бункера через тарированную диафрагму пересыпаются в камеру статического давления. Вместе с материалом через ограничивающую апертуру 4 в камеру попадает воздух, создавая эжекционное давление.



Рис. 1. Внешний вид экспериментального стенда:

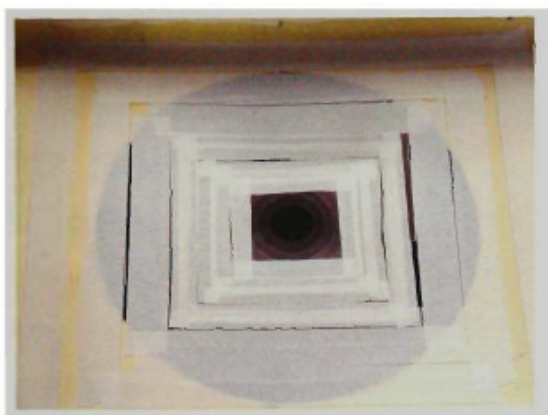
- 1 – верхний бункер; 2 – шибер-диафрагма; 3 – выравнивающий желоб; 4 – камера статического давления; 5 – сменные апертуры; 6 – индикатор разрежения; 7 – мерная диафрагма; 8 – дифманометр; 9 – регулирующий клапан; 10 – вентилятор; 11 – рама

Сменная апертура, предложенная Ze Qin Liu (см. рис. 2, а), в случае перегрузки относительно

крупнофракционного материала оказалась чрезмерно жесткой, что приводило к

значительному разбрасыванию частиц, и была заменена оригинальной конструкцией (рис. 2, б).

Количество материала, не попавшего в нижний бункер не превышает 1 %.



а)



б)

Рис. 2. Сменная апертура: а) предложенная Ze Qin Liu, б) предложенная автором.

Расход аспирируемого воздуха определяется с помощью пневмометрической трубки 6 с дифманометром 7. Регулируя расход аспирируемого воздуха клапаном 8, добиваемся равенства расхода удаляемого и поступающего воздуха и, следовательно, нулевой разницы статического давления в камере и в окружающей

среде. Нулевая разница статического давления в камере определяется с помощью индикатора 5 – папиросной бумаги размером 0,1×0,1 м. Бумажный лист эффективно сглаживает пульсации давления и позволяет достаточно точно определить момент равенства давлений в камере и окружающей среде (рис. 3).



а)



б)

Рис. 3. Индикатор разряжения: а) положение индикатора при наличии избыточного эжекционного давления (вентилятор выключен), б) положение индикатора при отсутствии эжекционного давления (вентилятор включен)

В качестве вентилятора 9 использовался канальный вентилятор СК 160 С ( $Q=950 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $n=2480 \text{ об/мин}$ ,  $N_y=100 \text{ Вт}$ ).

Образцы материала с заданным

гранулометрическим составом [8] готовились с помощью ситового разделения из трёх фракций 0,94; 3,75; 15 мм таблица 1. При этом среднемассовый диаметр  $d_p$  у всех образцов

одинаков, что при расчете по существующим методикам [9–10] дает одинаковое количество

аспирационного воздуха.

Таблица 1

### Гранулометрические характеристики образцов материала

Образец №	Тип материала	Массовые доли классов, %			Среднемассовый диаметр $d_{cp}$ , мм	Класс материала
		1,85 мм	3,75 мм	7,5 мм		
№ 1	Полифракционный	66	34	0	2,51	мелкозернистый
№ 2	Полифракционный	76	19	5	2,51	мелкозернистый
№ 3	Полифракционный	88	1	11	2,51	мелкозернистый

Результаты сравнения расходов воздуха, полученных аналитическим и экспериментальным путем представлены на рис. 4. Из сравнения расчётных и экспериментальных данных для острозернистых частиц следует вывод об их высокой тесноте связи (коэффициент линейной корреляции Пирсона равен  $0,998 \pm 0,01$ ), достоверности и адекватности расчётных значений (критерий достоверности Стьюдента равен  $0,13$ , критерий адекватности Фишера равен  $1,31$ ) [11].

При одинаковом среднем диаметре  $d_{cp}$ , но различном гранулометрическом составе (материалы 1-3) расход эжектируемого воздуха, не одинаков, он увеличивается с ростом счетного доли частиц фракций, близких к  $2,5$  мм, имеющих, как известно наибольшую эжекционную способность.

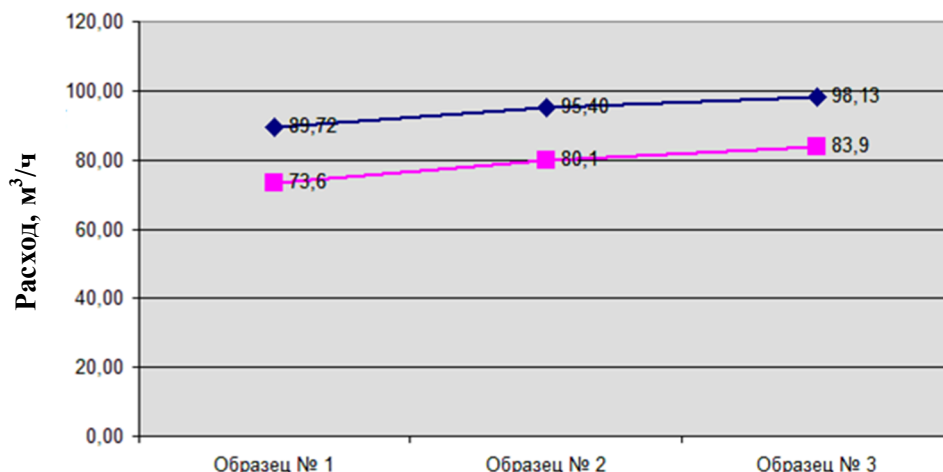


Рис. 4. Расходы эжектируемого воздуха: ■ – расчетные значения, ◆ – экспериментальные значения.

**Выводы.** На представленной экспериментальной установке исследовано явление эжекции воздуха полифракционным потоком сыпучего материала и выявлена зависимость расхода эжектируемого материалом воздуха, а, следовательно, коэффициента лобового сопротивления частиц от гранулометрического состава материала. Подтверждены результаты аналитических исследований и выявлены зависимости изменения расхода эжектируемого воздуха от дисперсного состава перегружаемого материала.

**Источник финансирования.** Грант РФФИ №. 16-08-00074а; Программа развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Логачёв И.Н., Попов Е.Н. Вероятностно-статистический подход к описанию аэро-

динамического взаимодействия коллектива падающих частиц с воздухом // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 10. С. 120–123.

2. Логачёв И.Н., Попов Е.Н. Вероятностно-статистический подход к описанию аэродинамического взаимодействия коллектива падающих частиц с воздухом: случай полифракционного материала // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. №12. С. 95–99.

3. Нейков О.Д., Логачёв И.Н. Аспирация и обеспыливание воздуха при производстве порошков. М.: Металлургия, 1981. 192 с.

4. Минко В.А., Логачёв И.Н., Логачёв К.И. и др. Обеспыливающая вентиляция. Под общ. ред. В.А. Минко. Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. 565 с.

5. Logachev I.N., Logachev K.I. Industrial air quality and ventilation: controlling dust emissions. Boca Raton: CRC Press, 2014.

6. Логачёв И.Н., Логачёв К.И. Аэродинамические основы аспирации. СПб: Химиздат, 2005. 659 с.

7. Liu Ze Qin, 2003. Air entrainment in free falling bulk materials, Doctor of Philosophy thesis, Faculty of Engineering, University of Wollongong.

8. Рачинский Ф.Ю., Рачинская М.Ф. Техника лабораторных работ. Л.: Химия, 1982. 432 с.

9. Временные указания по расчету объемов аспирируемого воздуха от укрытий дробильного оборудования и оборудования, перерабатывающего нагретые влажные материалы. Алма-

Ата, ГПИ Сантехпроект, 1973, (А/о ГПИ Сантехпроект, ВНИИБТГ), 96 с.

10. Временные указания по расчету объемов аспирируемого воздуха от укрытий мест перегрузок при транспортировании пылящих материалов. АЗ-611, М.: изд-во ГПИ Сантехпроект, 1973, 31 с. (ГПИ Сантехпроект, НИИрудвентиляция, ИПМ АН УССР). 1973, 31 с.

11. Рогов В.А., Позняк Г.Г. Методика и практика технических экспериментов: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр "Академия", 2005. 288 с.

#### Информация об авторах

**Попов Евгений Николаевич**, старший преподаватель кафедры теплогазоснабжения и вентиляции.

E-mail: popov.en@bstu.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.  
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

*Поступила в январе 2018 г.*

© Попов Е.Н., 2018

**E.N. Popov**

### RESEARCH OF THE EJECTING PROPERTIES OF A POLYFRACTION BULK MATERIAL FLOW

*This work is aimed at confirming the adequacy of the probabilistic and statistical approach to determining the aerodynamic resistance coefficient of particles in a flow of the free falling polyfractional material, suggested by the author. The aerodynamic resistance coefficient of particles in a flow of falling material is defined by calculating the probability of finding particles out of air shadows of the neighboring particles. The laboratory experiment was performed on the offered experimental samples of bulk materials having different particle size distribution, but the identical average diameter of particles. The design of a laboratory experimental installation which allows determining the consumption of air, ejected by a polyfractional material flow, was described. The amount of the air, ejected with experimental samples, depends on their particle size distribution that confirms the insufficiency of describing the properties of bulk material only with the average diameter value. The given comparison of results of the analytical calculations with experimental data shows the reliability and adequacy of the calculated values.*

**Keywords:** aspiration of bunkers, loading of bunkers, polydispersed material, polyfractional material, air ejection, dynamics of particles, aerodynamics, dust-removing ventilation.

#### REFERENCES

1. Logachev I.N., Popov E.N. Probability and statistical approach to the description of aerodynamic interaction of collective of incident particles with air // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2016, no. 10, pp. 120–123.

2. Logachev I.N., Popov E.N. Probability and statistical approach to the description of aerodynamic interaction of collective of incident particles with air: case of polyfractional material // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2016, no. 12, pp. 95–99.

3. Neykov O.D., Logachev I.N. Aspiration and dust removal of air by production of powders. Moscow: Metallurgy, 1981, 192 p.

4. Minko V.A., Logachev I.N., Logachev K.I., etc. The removing dust ventilation. Under a general

edition of V.A. Minko. Belgorod: BGTU publishing house, 2010. 565 p.

5. Logachev I.N., Logachev K.I. Industrial air quality and ventilation: controlling dust emissions. Boca Raton: CRC Press, 2014.

6. Logachev I.N., Logachyov K.I. Aerodynamic bases of aspiration. St. Petersburg: Himizdat, 2005. 659 p.

7. Liu Ze Qin, 2003. Air entrainment in free falling bulk materials, Doctor of Philosophy thesis, Faculty of Engineering, University of Wollongong.

8. Rachinsky F.Yu., Rachinsky M.F. Technique of laboratory works. Leningrad: Chemistry, 1982, 432 p.

9. Temporary instructions by calculation of volumes of aspiration of air from shelters of the crushing equipment and equipment processing

heated damp materials. Alma-Ata, GPI Santekhproyekt, 1973, (And / about GPI Santekhproyekt, VNIIBTG), 96 p.

10. Temporary instructions by calculation of volumes of aspiriruyemy air from shelters of places

of overloads at transportation of the raising dust materials. A3-611, Moscow: Santntekhproyekt GPI publishing house, 1973, 31 p.

11. Rogov V.A., Poznyak G.G. Methodic and practicing of technical experiments: Studies. a grant for student. institutions. Moscow: Publishing center "Akademiya", 2005. 288 p.

*Information about the author*

**Evgeny N. Popov**, Senior lecturer.

E-mail: evg-popov@yandex.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received in January 2018*