

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАСЧЕТА СИСТЕМ ВАКУУМНОЙ УБОРКИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ

Аверьянов В. К., Мартьянова А. Ю., Суханова И. И.

## INCREASING EFFICIENCY OF VACUUM CLEANING SYSTEMS' DESIGN TO REDUCE EMISSIONS IN THE ATMOSPHERE

Averyanov V. K., Martyanova A. Yu., Sukhanova I. I.

### Аннотация

Приведены результаты лабораторных и теоретических исследований аэродинамических характеристик современных систем вакуумной пылеуборки, обеспечивающих снижение концентрации пыли как в воздушной среде производственных помещений, так и на территории промышленных предприятий. Выполнен качественный и количественный анализ пылевыведений и содержания пыли в воздухе цехов предприятий строительного комплекса и в атмосферном воздухе. Разработана экспериментальная установка для изучения скорости витания совокупности твердых частиц, характерных для предприятий по производству сухих строительных смесей и цемента. Представлены результаты экспериментальных исследований для расчета систем вакуумной уборки производственных помещений с выделениями отходов и просыпей. На основании трехфакторного эксперимента получено регрессионное уравнение для определения скорости витания в зависимости от диаметра, плотности и массовой концентрации частиц. Предложено критериальное уравнение для нахождения числа Рейнольдса, определенного по скорости витания шарообразных частиц.

**Ключевые слова:** совокупность твердых частиц, скорость витания, система вакуумной уборки, критериальное уравнение, число Рейнольдса.

### Введение

Предприятия строительной индустрии являются источниками интенсивных пылевыведений в атмосферу, что приводит к экологическим проблемам не только промышленных площадок, но и прилегающих территорий. Причины повышенного загрязнения атмосферы выбросами пыли кроются как в особенностях самой технологии производства, так и недостаточно эффективной работе систем обеспыливания воздуха. При пре-

### Abstract

The article presents results of laboratory and theoretical studies on aerodynamic characteristics of modern vacuum cleaning systems reducing dust concentration both in the air of production premises and in the territory of industrial enterprises. Quantitative and qualitative analyses of dust emission and concentration in the air of construction enterprises' shops and in the atmosphere are performed. A test unit to study the terminal velocity of the assembly of solid particles typical for enterprises producing dry building mixes and cement is designed. Results of experimental studies to design vacuum cleaning systems for production premises, where production is characterized by formation of wastes and spills, are presented. Based on a three-factor experiment, a regression equation to determine the terminal velocity depending on the diameter, density and mass concentration of particles is obtained. A criterion equation to find the Reynolds number determined on the basis of the terminal velocity of spherical particles is suggested.

**Keywords:** assembly of solid particles, terminal velocity, vacuum cleaning system, criterion equation, Reynolds number.

вышении предельно допустимых концентраций взвешенная в воздухе рабочей зоны пыль приводит к увеличению нагрузки на очистное оборудование и преждевременному его износу, что также является причиной загрязнения атмосферного воздуха. Для обеспечения нормируемых параметров воздушной среды помещений и атмосферного воздуха на предприятиях строительной индустрии предлагается, наряду с местной вы-

тяжной вентиляции, проектировать современные системы вакуумной пылеуборки.

При производстве и транспортировании сыпучих материалов, в частности сухих строительных смесей и цемента [11], выделяется значительное количество твердых частиц [2], в том числе в виде отходов и просыпей [12].

В соответствии с данными работы [1] при производстве цемента образуется более 20 тыс. м<sup>3</sup> вредных газов на каждую тонну продукции. В процессе измельчения исходный материал практически полностью переходит в пылевидное состояние [13]. Аналогично и при производстве сухих строительных смесей образуется значительное количество как газообразных, так и твердых загрязнителей окружающей среды.

Вследствие работы систем приточной вентиляции, движения транспортных средств и людей происходит вторичное пылеобразование [12] за счет пыли, осевшей на твердых поверхностях помещения и оборудования [7]. Как показывают результаты натурных исследований авторов, концентрации пыли в рабочей зоне исследуемых помещений превышает предельно допустимую концентрацию 4 мг/м<sup>3</sup> в 3–4 раза при отсутствии аварийных ситуаций. Одновременно на территории промышленного предприятия концентрации пыли достигают значений, в 5–7 раз превышающих максимально разовую предельно допустимую концентрацию 2 мг/м<sup>3</sup>.

Изучению движения пылевоздушных потоков и решению практических задач по обеспыливанию воздуха предприятий строительной индустрии посвящены работы отечественных и зарубежных ученых: Б. Бретшнайдера, Р. Буройда, К. М. Гринева, Т. А. Дацюк, Е. В. Доната, М. П. Калинушкина, В. В. Кафарова, Ю. М. Кузнецова, Л. С. Клячко, П. А. Коузова, И. Н. Логачева, К. И. Логачева, И. П. Малевича, В. И. Минко, О. Д. Нейкова, В. И. Полушкина, А. Г. Сотникова, V. W. Goldschmidt, H. Goodfellow и др.

Анализ исследований в области охраны окружающей среды и улучшения условий труда при производстве сыпучих материалов показывает, что наиболее эффективной с точки зрения обеспечения как санитарно-гигиенических требований, так и утилизации отходов является вакуумная пылеуборка, практически исключая вторичное пылеобразование [5]. Такая система

предназначена для удаления пыли с любых поверхностей независимо от их назначения, расположения, конфигурации, материала и других особенностей [15]. Пневматические пылеуборочные установки можно считать универсальными, поскольку с их помощью могут удаляться твердые частицы различных размеров от 1 мкм до 10 мм [4]. При использовании таких установок отходы, просыпи и пыль могут быть возвращены в технологический процесс [5].

Однако для проектирования систем вакуумной пылеуборки, как и любых аспирационных систем, необходимо знать аэродинамические характеристики, в первую очередь скорости транспортирования пылевоздушного потока. Немногочисленные сведения о значениях скоростей витания и транспортирования получены, в основном, опытным путем [9] и приведены в справочной литературе для ограниченного числа материалов. Это обстоятельство определяет актуальность исследований аэродинамических характеристик пылевоздушных потоков для повышения эффективности расчетов систем пневмотранспорта и, в конечном итоге, для оздоровления окружающей среды. Цель исследования заключается в экспериментальном выявлении аэродинамических характеристик для расчета вакуумных систем обеспыливания. В данной работе ставится задача получить на основании экспериментальных исследований зависимость скоростей витания и транспортирования твердых частиц от их концентрации, плотности и размеров.

#### Методы и материалы

Основными местами пылеобразования при производстве цемента являются конвейерные линии, узлы пересыпки сырья и материалов (рис. 1), пылеуловители [7, 8]. Данные о качественном и количественном составе исходных материалов и продукции представлены в табл. 1 по результатам анализа, проведенного в работах [2, 13].

Скорость транспортирования согласно результатам известных исследований, в частности в работах [3, 9, 18], рекомендуется определять на основании эмпирических значений скорости витания одиночных частиц, определенных для некоторых материалов. Кроме того, для практических расчетов часто недостаточно знать значение скорости витания только одиночной частицы.

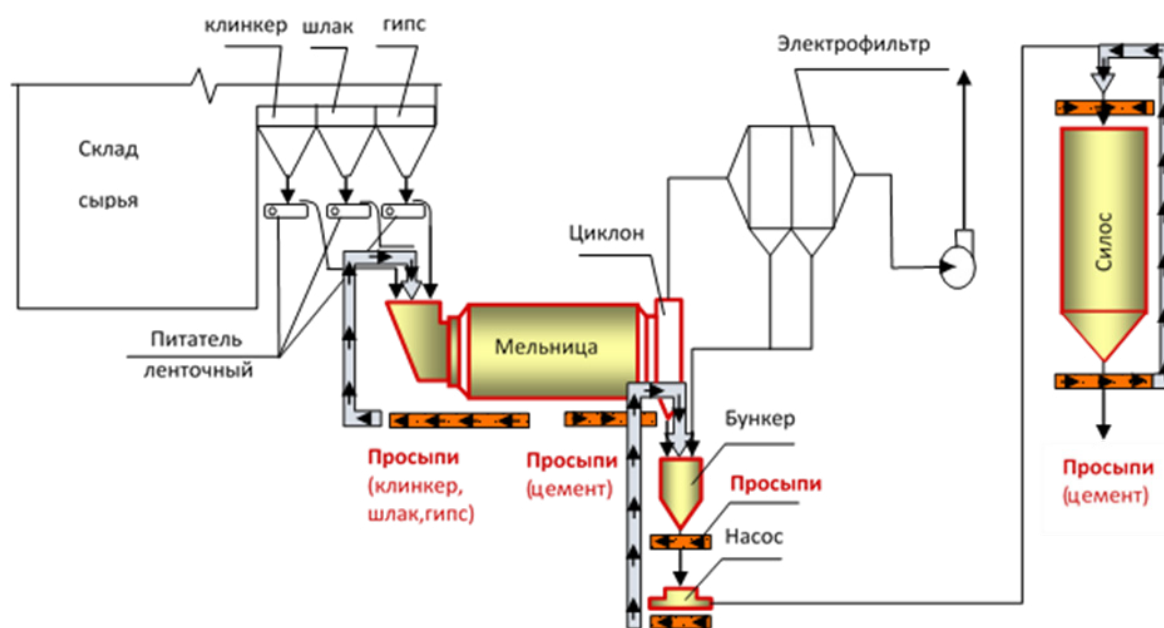


Рис. 1. Места образования просыпей в цехе помола цемента и силосах

Таблица 1

Состав сырьевых материалов и клинкера [2, 14]

Материал	Содержание (масс. %)									
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Производство цемента										
Фосфогипс	0,5	0,6	0,2	–	–	–	–	44,3	32,5	1,6
Нефелиновый шлам	31,91	3,72	2,11	1,08	1,05	1,47	0,27	0,16	0,21	0,52
Клинкер	22,15	4,54	3,36	1,25	0,60	0,66	0,32	0,23	64,21	–
Гидрогранатовый шлам	0,01–0,15	24,91–24,60	0,16	0,72–0,70	–	5,84–5,75	–	–	38,31–37,72	–
Производство сухих строительных смесей										
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Песчаная пыль	95	0,44	0,75	0,85	–	0,82	–	–	0,7	–
Известь	–	–	–	5	–	–	–	–	60	–
Гипс	0,04–1,68	0,02–0,42	0,01–0,04	0,28–4,26	–	–	–	–	31,7–36,7	–
Цемент	20,81	5,64	2,46	2,74	–	–	–	2,7	63,15	–

Авторами предпринята попытка нахождения скорости витания совокупности монодисперсных частиц с различной массовой концентрацией.

Методологической основой данного исследования являются теория тепломассообменных процессов, основные положения теоретической и экспериментальной аэродинамики, кроме того использованы методы математической статистики планирования эксперимента.

На лабораторной установке, схема которой приведена в работе [10], проведен эксперимент с тремя варьируемыми факторами: плотностью, диаметром и массовой концентрацией. В качестве функции отклика принята скорость витания частиц в вертикальном воздуховоде.

Для проведения эксперимента использован монодисперсный материал из ячеистого бетона плотностью 400 и 800 кг/м<sup>3</sup>, предварительно

механически измельченный и просеянный через стандартный набор сит.

**Результаты исследования и обсуждение**

На основании обработки данных трехфакторного эксперимента получено регрессионное уравнение [11] для вычисления скорости витания совокупностей монодисперсных материалов:

$$w = 5,42 - 2,37 \cdot 10^{-4} \rho_{\text{ч}} + 955,98 d_{\text{ч}} - 5,86 \mu + 8,46 \cdot 10^{-3} \rho_{\text{ч}} \mu - 454,11 d_{\text{ч}} \mu, \quad (1)$$

где  $\rho_{\text{ч}}$  — плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $d_{\text{ч}}$  — размер частиц, м;  $\mu$  — массовая концентрация, кг/кг.

На рис. 2 представлены результаты экспериментальных исследований зависимости скорости витания от различных факторов. Так, следует отметить, что с увеличением массовой концентрации независимо от размеров и плотности частиц материала скорость витания уменьшается.

С целью проверки возможности использования регрессионного уравнения (1) для расчета систем, перемещающих твердые частицы с другими физическими свойствами, выполнены исследования скорости витания совокупности частиц из твердого пластика. Для исключения влияния формы частиц в лабораторном эксперименте использованы частицы шарообразной формы диаметром  $d_{\text{ч}} = 6$  мм и плотностью  $\rho_{\text{ч}} = 970$  кг/м<sup>3</sup>. Результаты исследований приведены на рис. 3.

Анализируя результаты исследований, можно сделать вывод об удовлетворительной схожести данных лабораторного эксперимента и расчета по формуле (1). Максимальное отклонение составляет не более 3 %. Обращает на себя внимание более интенсивный характер снижения экспериментальных значений скорости витания с увеличением массовой концентрации, что, очевидно, связано с особенностями инструментальных измерений.

Для обобщения результатов исследований скоростей витания совокупности твердых частиц в работе [6] получены критериальные уравнения. В настоящей работе выполнена оценка возможности использования этих зависимостей для нахождения скоростей витания совокупности твердых частиц из других материалов.

В работе [19] выявлены особенности движения твердых частиц в потоке газа, связанные, с одной стороны, с их межфазным взаимодействием, а с другой — с гидравлическим режимом те-

чения. Вследствие сложности изучения этих процессов теоретические решения, описывающие влияние примесей (твердых частиц) на аэродинамические процессы пылевоздушных потоков, получены только для ламинарного режима течения. При больших числах Рейнольдса (Re) получение таких решений затруднительно ввиду сложности математического описания взаимодействия частиц. Кроме того, движение взвешенных частиц неизбежно связано с процессами осаждения. Для исследования влияния процесса осаждения совокупности частиц на аэродинамические характеристики пылевоздушного потока приняты результаты моделирования аэродинамических процессов осаждения на основе дифференциальных уравнений Навье–Стокса и неразрывности, представленные в работе [6]. В частности, использована полученная для турбулентного движения ( $500 < Re < 2 \cdot 10^5$ ) одиночной шарообразной частицы зависимость, связывающая общий коэффициент сопротивления пылевоздушного потока ( $\xi = 0,43$ ) и величину критерия Рейнольдса, определяющего начало режима осаждения твердой частицы:

$$\xi Re^2 = \frac{4}{3} Ar. \quad (2)$$

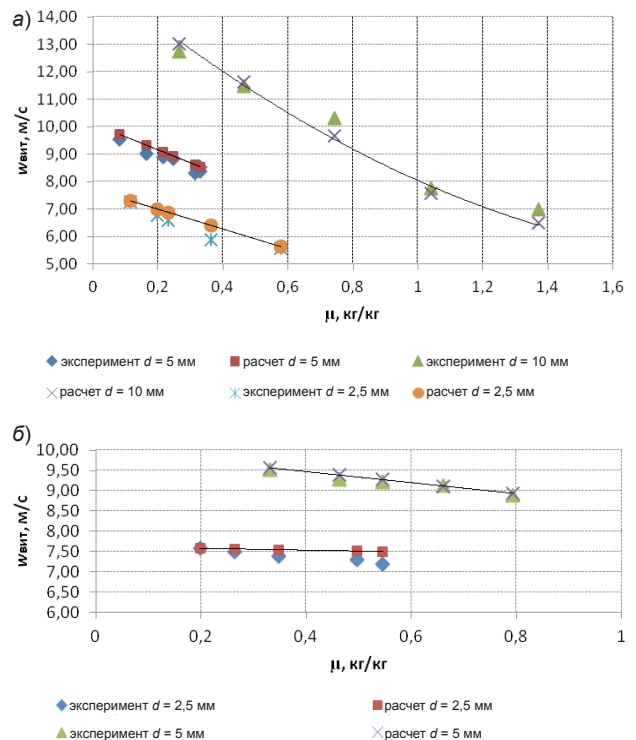


Рис. 2. Зависимость скорости витания от массовой концентрации при: а —  $\rho = 400 \text{ кг/м}^3$ ; б —  $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$

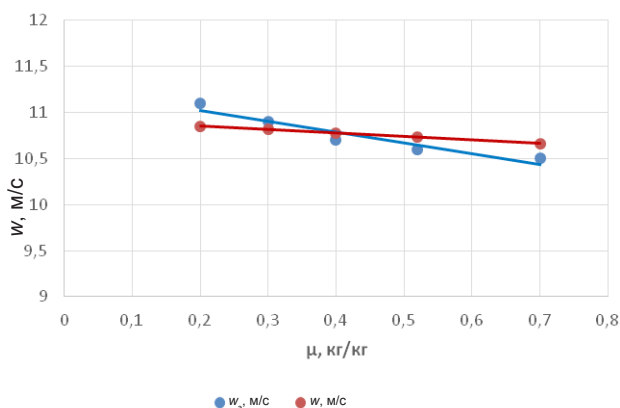


Рис. 3. Зависимость скорости витания совокупности пластиковых частиц  $\rho = 970 \text{ кг/м}^3$  и диаметром  $d_c = 6 \text{ мм}$  от массовой концентрации (индекс «э» обозначает экспериментальные данные)

Или

$$Re = 1,74 Ar^{0,5}, \quad (3)$$

где  $Ar$  — критерий Архимеда, величина которого определяется по формуле

$$Ar = \frac{gd_c^3}{\nu^2} \frac{\rho_c - \rho_B}{\rho_B}, \quad (4)$$

где  $\rho_B$ ,  $\nu$  — соответственно плотность,  $\text{кг/м}^3$ , и коэффициент кинематической вязкости воздуха,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Учитывая идентичность процессов осаждения одиночной частицы и совокупности таких частиц, для обработки результатов исследований авторами принят предложенный в работах [6, 17] подход, который заключается в получении критериальных зависимостей.

Общий вид критериального уравнения может быть записан в виде

$$Re = f(Ar, \mu). \quad (5)$$

После обработки получено следующее критериальное уравнение [11]:

$$Re = \frac{4}{3} \left( \frac{Ar}{\xi} \right)^{0,5} (1 - \mu)^{0,5}. \quad (6)$$

На рис. 4 приведены результаты исследований для частиц диаметром 5 мм и плотностью  $400 \text{ кг/м}^3$ :  $Re_e$  — экспериментальные значения числа Рейнольдса, и  $Re_k$  — значения, полученные по формуле (6).

Как показывают данные исследований авторов [6], при увеличении концентрации частиц в потоке скорость витания снижается вследствие возникающего явления стесненности, исследо-

ванного в работе. Для дальнейшего изучения аэродинамики пылевоздушных потоков использовано эмпирическое уравнение, устанавливающее связь между скоростями осаждения совокупности частиц  $w$  и одиночной частицы  $w_c$ :

$$\frac{w}{w_c} = \frac{1}{1 + 1,3\mu^{1/3}}, \quad (7)$$

где  $\mu'$  — концентрация частиц,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ .

На рис. 5 приведены результаты аналогичных исследований для пластиковых частиц, которые подтверждают целесообразность использования подобных критериальных зависимостей для расчета систем, транспортирующих твердые частицы из любых материалов.

Для исследования стесненности пылевоздушного потока использовано выражение для силы сопротивления из закона фильтрации Дарси:

$$F_c = 3\pi\mu d_c w_c \lambda, \quad (8)$$

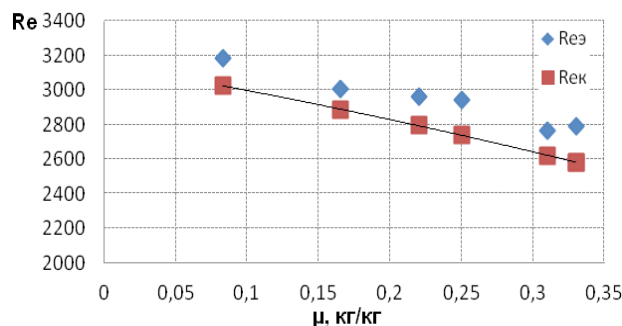


Рис. 4. Зависимость критерия Рейнольдса для частиц диаметром 5 мм и плотностью  $400 \text{ кг/м}^3$  от концентрации: по данным эксперимента ( $Re_e$ ) и по результатам расчета ( $Re_k$ ) по формуле (6)

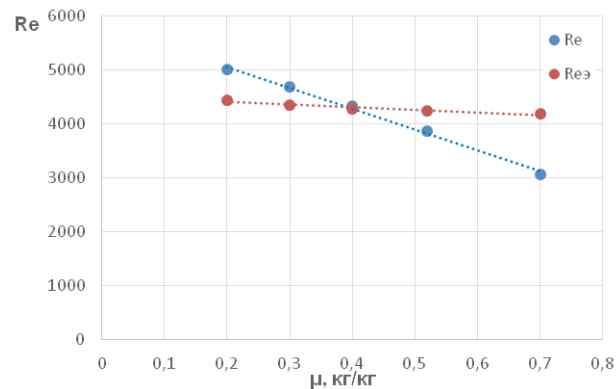


Рис. 5. Зависимость критерия Рейнольдса для пластиковых частиц диаметром 6 мм и плотностью  $970 \text{ кг/м}^3$ : по данным эксперимента  $Re_e$  и определенным по формуле (6)  $Re$

где  $\lambda$  — коэффициент, учитывающий взаимное влияние частиц, может быть определен по формуле из работы [6]:

$$\lambda = \frac{4 + 3\mu' + 3(8\mu' - 3\mu'^2)^{1/2}}{(2 - 3\mu')^2}. \quad (9)$$

Результаты исследований специалистов немецкой компании «NeueroFarm-und-FördertechnikGmbH» [21], производящей передвижные пневматические конвейеры с элементами пневмотранспорта для сыпучих материалов, коррелируют с данными, полученными авторами, что подтверждает достоверность результатов исследований.

Для оценки влияния стесненности использовано выражение (7), в результате чего получена формула для определения отношения скоростей витания совокупности (группы) частиц  $w_{\text{вит.гр}}$  и одиночной частицы  $w_{\text{вит.1}}$  [11]:

$$\frac{w_{\text{вит.гр}}}{w_{\text{вит.1}}} = \frac{0,75 \cdot \lambda^{0,25} \left(\frac{D}{d_{\text{ч}}}\right)^{0,2}}{(1 + \mu)^{0,25}}, \quad (10)$$

где  $D$  — диаметр воздуховода, м.

На рис. 6 приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований, обработанные по формуле (10).

Имеет место удовлетворительная сходимость результатов оценки взаимного влияния твердых частиц при определении скорости витания совокупности твердых частиц.

### Заключение

На разработанной авторами экспериментальной установке выполнен полный трехфакторный эксперимент по исследованию скорости витания

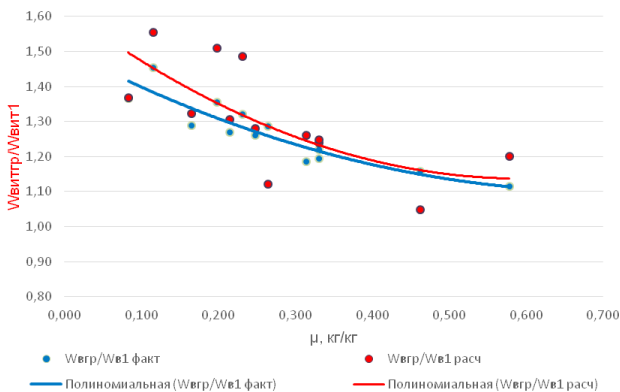


Рис. 6. Данные обработки исследований по формуле (10)

твердых частиц в зависимости от плотности, диаметра и массовой концентрации. На основании обобщения экспериментальных данных получено критериальное уравнение для нахождения числа Рейнольдса, определенного по скорости витания шарообразных частиц. Полученная зависимость использована при разработке алгоритма расчета систем вакуумной уборки производственных помещений с пылевыделениями, использование которых позволит снизить запыленность не только на рабочей зоне помещений, но и атмосферного воздуха на территории промышленной площадки.

### Литература

1. Беляева, В. И. и Классен, В. К. (2008). Энергосбережение и снижение выбросов загрязняющих веществ при обжиге цементного клинкера. Безопасность жизнедеятельности, № 6, сс. 26–28.
2. Бретшнайдер, Б., Курфюрст, И., Вашкевич, Н. и Туболкин, А. (1989). Охрана воздушного бассейна от загрязнений: технология и контроль. Л.: Химия, 288 с.
3. Воскресенский, В. Е. (2008). Системы пневмотранспорта, пылеулавливания и вентиляции на деревообрабатывающих предприятиях. Теория и практика: в 2 т. Т. 1: Аспирация и транспортные пневмосистемы. СПб.: Политехника, 430 с.
4. Донат, Е. В. (1960). Пневматическая уборка пыли в цехах промышленных предприятий. М.: Издательство Профиздат, 170 с.
5. Калинушкин, М. П. и Грачев, Ю. Г. (1987). Вакуумная пылеуборка на предприятиях легкой промышленности. М.: Легпромбытиздат, 72 с.
6. Кафаров, В. В. и Глебов, М. Б. (1991). Математическое моделирование основных процессов химических производств: учебное пособие для вузов. М.: Высшая школа, 400 с.
7. Кузнецов, Ю. М. (2005). Пневмотранспорт: теория и практика. Екатеринбург: УрО РАН, 61 с.
8. Логачев, И. Н. и Логачев, К. И. (2005). Аэродинамические основы аспирации: Монография. СПб.: Химиздат, 659 с.
9. Малевич, И. П., Серяков, В. С. и Мишин, А. В. (1984). Транспортировка и складирование порошкообразных строительных материалов. М.: Стройиздат, 184 с.
10. Мартянова, А. Ю. и Суханова, И. И. (2015). Определение скорости витания монодисперсных строительных материалов по данным экспериментальных исследований. Вестник гражданских инженеров, № 5 (52), сс. 186–190.
11. Мартянова, А. Ю. (2017). Совершенствование методов расчета вакуумных систем обеспыливания на предприятиях по производству цемента и сухих строительных смесей. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 192 с.

12. Микульский, В. Г., Куприянов, В. Н., Козлов, В. В., Хрулев, В. М., Горчаков, В. И., Сахаров, Г. П., Орентлихер, Л. П. и Рахимов, Р. З. (2007). Строительные материалы. Материаловедение. Технология конструкционных материалов. М.: АСВ, 520 с.

13. Минко, В. А. (1981). Обеспыливание технологических процессов производства строительных материалов. Воронеж: Изд-во ВГУ, 176 с.

14. Полонский, В. М. (2006). Охрана воздушного бассейна заводов строительной индустрии: учебное пособие. Самара: изд-во СГАСУ, 200 с.

15. Нейков, О. Д. и Логачев, И. Н. (1981). Аспирация и обеспыливание воздуха при производстве порошков. 2-е издание. М.: Металлургия, 192 с.

16. Полушкин, В. И., Ситников, Э. А. и Суханова, И. И. (2008). Пневматическая пылеуборка в производственных помещениях. Безопасность жизнедеятельности, № 5, сс. 23–27.

17. Разумов, И. М. (1979). Пневно- и гидротранспорт в химической промышленности. Серия «Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии». М.: Химия, 248 с.

18. Сотников, А. Г. (2007). Процессы, аппараты и системы кондиционирования воздуха и вентиляции. Теория, техника и проектирование на рубеже столетий. Том II, ч. 2. СПб.: АТ-Publishing, 512 с.

19. Сугак, Е. В., Войнов, Н. А. и Николаев, Н. А. (1999). Очистка газовых выбросов в аппаратах с интенсивными гидродинамическими режимами. Казань: РИЦ «Школа», 224 с.

20. Goodfellow, H. D., Tahti, E. (2001). Industrial ventilation design guidebook. San-Diego, CA: Academic Press, 1519 p.

21. Tiu.ru (2018). ООО «Нойеро». [online] Доступно по ссылке: <http://neuero.tiu.ru/> (дата обращения: 03.12.2018)

## References

1. Belyayeva, V. I., Klassen, V. K. (2008). Energosberezheniye i snizheniye vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv pri obzhige tsementnogo klinkera [Energy saving and reduction of pollution emission when firing cement clinker]. *Life Safety*, No. 6, pp. 26–28 (in Russian).

2. Bretschneider, B., Kurfürst, J., Vashkevich, N., Tubolkin, A. (1989). *Okhrana vozdušnogo basseyna ot zagryazneniy: tekhnologiya i kontrol* [Air basin protection against pollution: technology and control]. Leningrad: Khimiya, 288 p. (in Russian).

3. Voskresensky, V. Ye. (2008). *Systemy pnevмотransporta, pylulavlivaniya i ventilyatsii na derevoobrabatyvayushchikh predpriyatiyakh. Teoriya i praktika: v 2 t. T. 1: aspiratsiya i transportnye pnevmosistemy* [Systems of pneumatic transportation, dust collection and ventilation at woodworking enterprises. Theory and practice: in 2 volumes. Volume 1: aspiration and transport pneumatic systems]. Saint Petersburg: Politehnika, 430 p. (in Russian).

4. Donat, Ye. V. (1960). *Pnevmaticheskaya uborka pyli d tsekhakh promyshlennykh predpriyatiy* [Pneumatic dust handling at shops of industrial enterprises]. Moscow: Profizdat, 170 p. (in Russian).

5. Kalinushkin, M. P., Grachyov, Yu. G. (1987). *Vakuumnaya pyluborka na predpriyatiyakh legkoy promyshlennosti* [Vacuum

dust cleaning at consumer industry enterprises]. Moscow: Legprombytzdat, 72 p. (in Russian).

6. Kafarov, V. V., Glebov, M. B. (1991). *Matematicheskoye modelirovaniye osnovnykh protsessov khimicheskikh proizvodstv: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Mathematical modeling of basic processes at chemical production enterprises: study guide for higher education institutions]. Moscow: Vysshaya Shkola, 400 p. (in Russian).

7. Kuznetsov, Yu. M. (2005). *Pnevмотransport: teoriya i praktika* [Pneumatic transport: theory and practice]. Yekaterinburg: Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 61 p. (in Russian).

8. Logachyov, I. N., Logachyov, K. I. (2005). *Aerodinamicheskiye osnovy aspiratsii: monografiya* [Aerodynamic basics of aspiration. Monograph]. Saint Petersburg: Khimizdat, 659 p. (in Russian).

9. Malevich, I. P., Seryakov, V. S., Mishin, A. V. (1984). *Transportirovka i skladirovaniye poroshkoobraznykh stroitelnykh materialov* [Transportation and storage of powdered construction materials]. Moscow: Stroyizdat, 184 p. (in Russian).

10. Martianova, A. Yu., Sukhanova, I. I. (2015). *Opredeleniye skorosti vitaniya monodispersnykh stroitelnykh materialov po danny eksperimentalnykh issledovaniy* [Determination the soaring speed of monodisperse building materials according to experimental study results]. *Bulletin of Civil Engineers (Vestnik razhdanskikh ingenerov)*, No. 5 (52), pp. 186–190 (in Russian).

11. Martianova, A. Yu. (2017). *Sovershenstvovaniye metodov raschyota vakuumnykh system obespylivaniya na predpriyatiyakh po proizvodstvu tsementa i sukhikh stroitelnykh smesey* [Improving methods for design of vacuum systems for dedusting at enterprises producing cement and dry building mixes]. PhD Thesis in Engineering. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 192 p. (in Russian).

12. Mikusky, V. G., Kupriyanov, V. N., Kozlov, V. V., Khrulyov, V. M., Gorchakov, V. I., Sakharov, G. P., Orentliker, L. P., Rakhimov, R. Z. (2007). *Stroitelnye materialy. Materialovedeniye. Tekhnologiya konstruktivnykh materialov* [Construction materials. Materials engineering. Construction materials engineering]. Moscow: ASV, 520 p. (in Russian).

13. Minko, V. A. (1981). *Obespylivaniye tekhnologicheskikh protsessov proizvodstva stroitelnykh materialov* [De-dusting in processes of construction materials' production]. Voronezh: Publishing House of the Voronezh State University, 176 p. (in Russian).

14. Polonsky, V. M. (2006). *Okhrana vozdušnogo basseyna zavodov stroitelnoy industrii: uchebnoye posobiye* [Protection of the air basin at construction plants]. Samara: Samara State University of Architecture and Civil Engineering, 200 p. (in Russian).

15. Neykov, O. D., Logachyov, I. N. (1981). *Aspiratsiya i obespylivaniye vozdukhа pri proizvodstve poroshkov* [Air aspiration and de-dusting in powder manufacturing]. 2<sup>nd</sup> edition. Moscow: Metallurgiya, 192 p. (in Russian).

16. Polushkin, V. I., Sitnikov, E. A., Sukhanova, I. I. (2008). *Pnevmaticheskaya pyluborka v proizvodstvennykh pomeshcheniyakh* [Pneumatic dust handling at industrial facilities]. *Life Safety*, No. 5, pp. 23–27 (in Russian).

17. Razumov, I. M. (1979). *Pnevmo- i gidrotransport v khimicheskoy promyshlennosti Seriya "Protsessy i apparaty khimicheskoy i neftekhimicheskoy tekhnologii"* [Pneumatic and hydraulic transport in the chemical industry. Series "Processes and machinery of chemical and petroleum engineering]. Moscow: Khimiya, 248 p. (in Russian).

18. Sotnikov, A. G. (2007). *Protsessy, apparaty i sistemy konditsionirovaniya vozdukhа i ventilyatsii. Teoriya, tekhnika i proektirovaniye na rubezhe stoletiy* [Processes, devices and systems of air conditioning and ventilation. Theory, engineering and design at the turn of the century], vol. II, part 2. Saint Petersburg: AT-Publishing, 512 p. (in Russian).

19. Sugak, Ye. V., Voynov, N. A., Nikolayev, N. A. (1999). *Ochistka gazovykh vybrosov v apparatakh s intensivnyimi gidrodinamicheskimi rezhimami* [Treatment of gas emissions in devices with intense hydrodynamic modes]. Kazan: Shkola Printing and Publications Center, 224 p. (in Russian).

20. Goodfellow, H. D., Tahti, E. (2001). *Industrial ventilation design guidebook*. San-Diego, CA: Academic Press, 1519 p.

21. Tiu.ru (2018). Neuro LLC. Available at: <http://neuro.tiu.ru/>

#### **Авторы**

**Аверьянов Владимир Константинович**

АО «Газпром промгаз», Санкт-Петербург, Россия

E-mail: [water@spbgasu.ru](mailto:water@spbgasu.ru)

**Мартьянова Анна Юрьевна**, канд. техн. наук, доцент  
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-  
строительный университет, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: [marta@spbgasu.ru](mailto:marta@spbgasu.ru)

**Суханова Инна Ивановна**, канд. техн. наук, доцент  
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-  
строительный университет, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: [inna.suhanova@mail.ru](mailto:inna.suhanova@mail.ru)

#### **Authors**

**Averyanov Vladimir Konstantinovich**

JSC Gazprom promgaz, St. Petersburg, Russia

E-mail: [water@spbgasu.ru](mailto:water@spbgasu.ru)

**Martyanova Anna Yurievna**, Ph. D. in Engineering,  
Associate Professor

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil  
Engineering, St. Petersburg, Russia

E-mail: [marta@spbgasu.ru](mailto:marta@spbgasu.ru)

**Sukhanova Inna Ivanovna**, Ph. D. in Engineering,  
Associate Professor

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil  
Engineering, St. Petersburg, Russia

E-mail: [inna.suhanova@mail.ru](mailto:inna.suhanova@mail.ru)