К. т. н. **А. С. Семиненко**, д. т. н. **К. И. Логачёв** (✉), к. т. н. **А. Б. Гольцов**, д. т. н. **О. А. Аверкова**

ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова», Белгород, Россия

УДК 533.6:628.511.2

СНИЖЕНИЕ ПЫЛЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ЗАГРУЗКЕ БУНКЕРОВ ПОРОШКООБРАЗНЫМ МАТЕРИАЛОМ. Часть 1. Методы исследования

Расчетным путем показана целесообразность веерной загрузки бункеров порошкообразным сыпучим материалом. Предложена конструкция кольцевого загрузочного устройства, использующего эффект Коанда, для снижения пылеобразования. Численно и экспериментально определены рациональные конструктивно-технологические параметры разработанного устройства.

Ключевые слова: *обеспыливание, сыпучие материалы, эффект Коанда, загрузочное устройство.*

ВВЕДЕНИЕ

Процессы загрузки сыпучих материалов сопровождаются значительным пылевыделением, что негативно сказывается на окружающей среде, здоровье человека [1, 2], долговечности оборудования и может привести к взрывам и пожарам [3]. Причинами образования и распространения пыли являются как процесс эжекции воздуха сыпучим материалом [4, 5], так и вторичное пылеобразование при взаимодействии потока с поверхностью [6, 7].Одним из способов снижения пылеобразования является снижение расхода эжектируемого воздуха [8, 9]. Методам расчета расхода эжектируемого воздуха [10–12], а также изучению процессов увлечения воздуха сыпучим материалом посвящено много научных работ [13–15]. Конструкция загрузочного устройства может существенно влиять на расход эжектируемого воздуха. Организация естественной рециркуляции за счет использования эффекта байпасирования [16, 17] или принудительной рециркуляции [18] позволяет снизить расход эжектируемого воздуха на 40–70 %. Но это усложняет технологию загрузки и мало применимо для загрузки мелкодисперсных сыпучих материалов в бункера.

Значительное влияние на интенсивность пылеобразования оказывают технологические параметры перегрузки: начальная степень истечения, расход материала и транспортирующего воздуха, эжекционное давление, степень заполнения бункера. Конструктивные характеристики бункерных хранилищ (геометрические характеристики бункеров, загрузочных устройств и т. п.) также влияют на пылеобразование. Поэтому с целью снижения количества образующейся пыли целесообразно снижать не только высоту падения, начальный диаметр струи путем загрузки сыпучего материала несколькими струями меньших диаметров, но и предусматривать возможность организации воздухораспределения [19, 20] в полости бункера.

Цель настоящей работы — разработка и расчетно-экспериментальное обоснование конструкции устройства для загрузки бункеров порошкообразным материалом, способствующей меньшему пылеобразованию.

✉

К. И. Логачёв
E-mail: kilogachev@mail.ru

РАСЧЕТ ПО АНАЛИТИЧЕСКИМ ЗАВИСИМОСТЯМ

Для анализа предлагаются три способа загрузки: осесимметричной, плоской и веерной струями. Из классических уравнений пограничного слоя Навье – Стокса [21] для слабозакрученных воздушных изотермических струй для определения поля скоростей при истечении из круглого отверстия (рис. 1, *а*) получены следующие выражения для относительных продольной $\bar{u}_x$ ($\bar{u}_x = u_x/u_{x0}$, где u_{x0} — скорость воздуха на выходе из патрубка, м/с), поперечной $\bar{u}_y$ ($\bar{u}_y = u_y/u_{x0}$) и окружной $\bar{u}_\varphi$ ($\bar{u}_\varphi = u_\varphi/u_{x0}$) скоростей:

$$\bar{u}_x = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{32}a\bar{x}z^2},\ \bar{u}_y = \frac{2a}{3}\sqrt{\frac{3}{32}}\frac{1}{\bar{y}}\left(\frac{7}{z} - \frac{1}{z^2} - 3\right),$$

$$\bar{u}_\varphi = \frac{\eta}{24(a\bar{x}z)^2}\sqrt{\frac{3}{32}}, \quad (1)$$

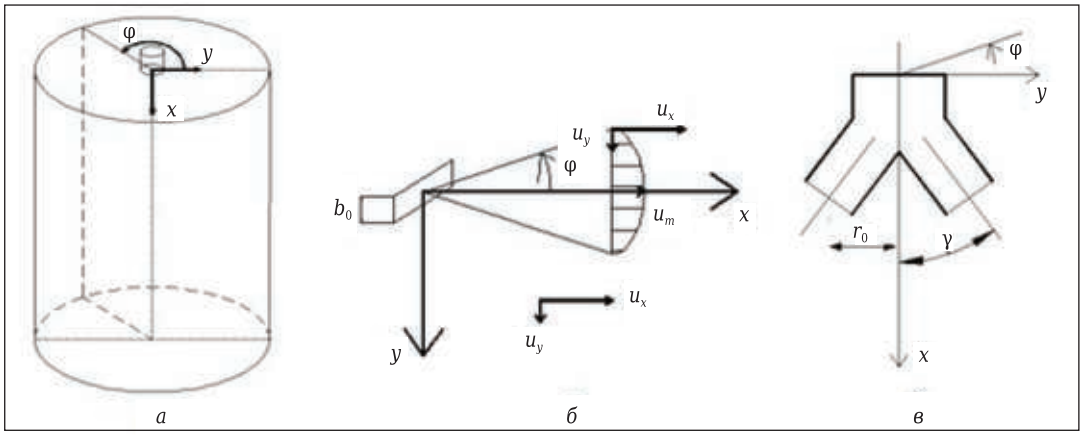

Рис. 1. Схема подачи струи в бункер: *а* — осесимметричная; *б* — щелевидная (плоская); *в* — веерная

где d_0 — диаметр патрубка (начального сечения струи), м; a — экспериментальный коэффициент, учитывающий «турбулентную» структуру струи; $\bar{x}$, $\bar{y}$ — безразмерные координаты, $\bar{x} = x/d_0$, $\bar{y} = y/d_0$; η — независимая переменная аффинных преобразований, $\eta = \bar{y}/(a\bar{x})$; $z = 1 + 0{,}125\eta^2$.

При истечении струи из щелевидного отверстия (плоская струя) (рис. 1, *б*) расчетные формулы примут вид:

$$\bar{u}_x = \sqrt{\frac{3}{4a}}\frac{1-\mathrm{th}^2\eta}{\sqrt{\bar{x}}},\ \bar{u}_y = \sqrt{\frac{3a}{4}}\,\mathrm{th}\eta\left(\frac{1}{2}-\mathrm{th}\eta\right), \qquad (2)$$

где $\bar{x}$, $\bar{y}$ — безразмерные координаты для плоской струи, $\bar{x} = x/b_0$, $\bar{y} = y/b_0$.

Для веерной струи (рис. 1, *в*) выражения для расчета поля скоростей:

$$\bar{u}_x = \frac{\sqrt{3\bar{r}_0}}{4a\bar{x}\mathrm{ch}^2\eta},\ \bar{u}_y = \sqrt{\frac{3a\bar{r}_0}{4}}\frac{\eta - 0{,}5\mathrm{sh}(2\eta)}{\bar{x}\mathrm{ch}^2\eta},$$

$$\bar{u}_\varphi = \frac{\sqrt{3\bar{r}_0}\,\bar{r}_0}{4a(\bar{x})^2\mathrm{tg}\gamma\mathrm{ch}^2\eta}, \qquad (3)$$

где $\bar{r}_0$ — радиус кольцевой щели (расстояние от оси 0*y* до начального сечения струи), м; γ — угол наклона вектора скорости выхода.

УСТАНОВКА ДЛЯ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследуемое устройство содержит трубопровод *1*, сопло *2*, образуемое тором *3* и конусом *4* с вершиной вверх (рис. 2). Предварительно осуществляли настройку устройства путем вертикального перемещения стержня *5* и конуса *4*: исходя из расхода воздуха, а также вида, плотности и крупности сыпучего материала выбирали рациональную величину зазора между тором *3* и конусом *4*, обеспечивающую наибольший угол отклонения потока при исключении возможности забивания сыпучим материалом сопла *2*. После проведения настройки положение стержня и конуса закрепляли контргайкой *6*. Поверхность тора, согласно эффекту Коанда, способствует «прилипанию» к ней потока воздуха, что соответствует формированию веерной струи. Обеспечиваются снижение уноса частиц системой аспирации и уменьшение вторичного пылеобразования загруженного материала.

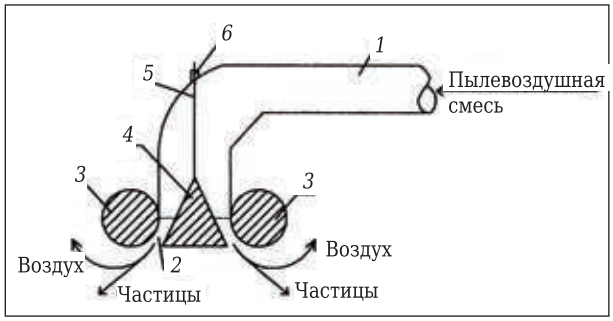

Рис. 2. Загрузочное устройство

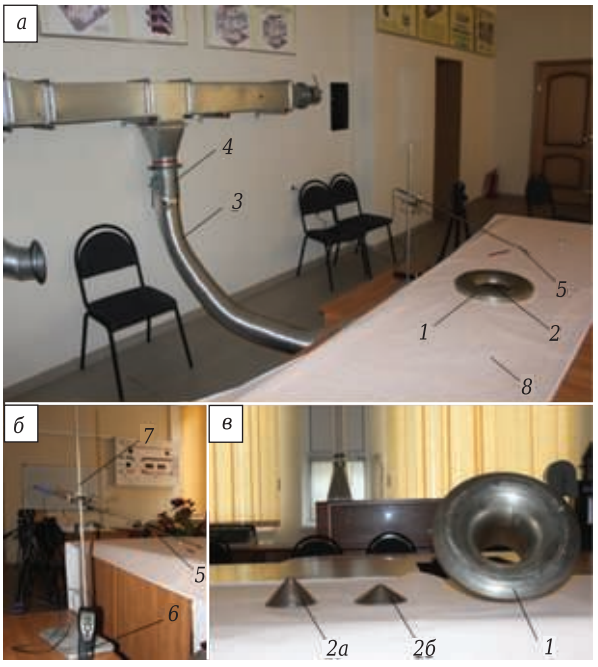

Рис. 3. Экспериментальная установка: *а* — общий вид; *б* — измерительный прибор; *в* — элементы устройства снижения пылеобразования (*1* — подающий патрубок с тороидальной поверхностью; *2* — конусный разделитель потока высотой 60 (*2а*) и 40 мм (*2б*); *3* — воздуховод вентиляционной сети; *4* — воздушный регулирующий клапан; *5* — измерительный зонд; *6* — термоанемометр; *7* — штатив; *8* — координатная сетка)

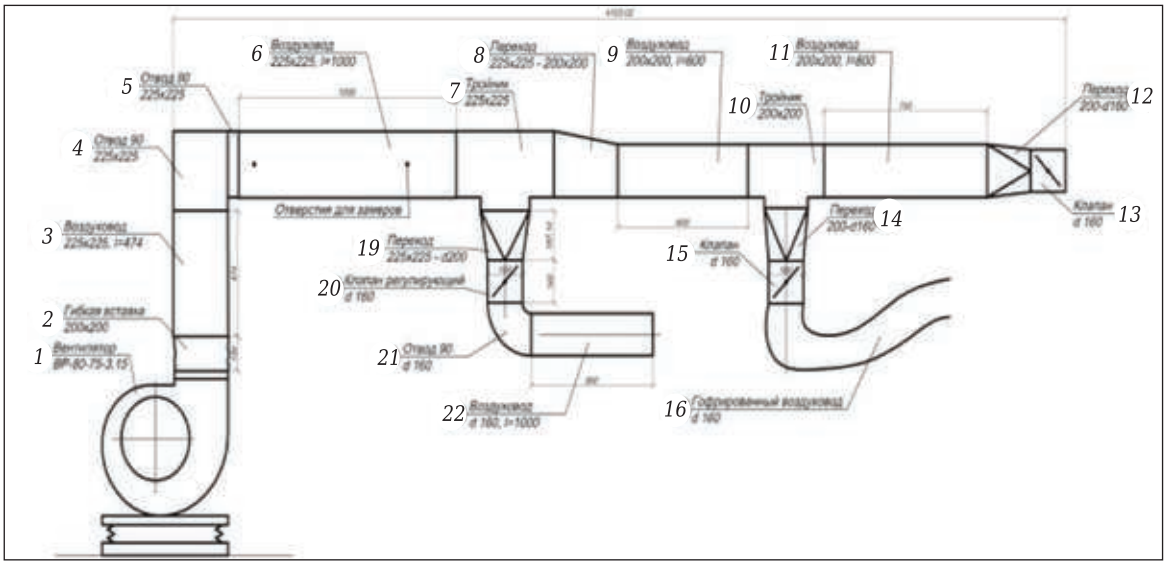

Рис. 4. Нагнетательная ветвь лабораторной вентиляционной сети: *1* — вентилятор ВР-80-75-3,15; *2* — гибкая вставка; *3, 6, 9, 11, 22* — воздуховод; *4, 5, 21* — отвод; *7, 10* — тройник; *8, 12, 14, 19* — переход; *13, 15, 20* — клапан регулирующий; *16* — гофрированный воздуховод

Для исследования динамики воздушных потоков, создаваемых устройством, разработана экспериментальная установка (рис. 3). Она представляет собой воздухораспределитель, состоящий из патрубка с тороидальной поверхностью и конусного разделителя потока, подключенного к вентиляционной сети гибким (гофрированным) воздуховодом.

В качестве побудителя принят вентилятор ВР-80-75-3,15. Регулировка расхода воздуха производится регулирующими клапанами. Для измерения скорости приточного воздуха в точках измерения использовали термоанемометр Testo 425. Измерения производили с помощью зонда с обогреваемой струной. Для исключения возмущения потока зонт установлен в штатив. Для визуализации направления движения воздуха использовали задымление потока. Для упрощения фиксации геометрических характеристик потока на плоскость нанесена координатная сетка с шагом в 1 мм.

Подключение экспериментальной установки к действующей лабораторной вентиляционной сети (рис. 4) позволило количественно регулировать воздушный поток, что обеспечило возможность выполнения замеров при разных эксплуатационных характеристиках.

МЕТОДЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Выделены факторы, позволяющие учесть максимальное количество геометрических размеров предлагаемого устройства и при этом обеспечить вписывание конуса в тор (рис. 5): $R_1 = R_2 \cdot \sin\alpha$, $H = R_2 \cdot \sin\gamma$, $\sin\gamma = H/R_2$, $\gamma = 180 - \alpha - \beta$, $\sin\alpha = R_1/R_2$.

В качестве отклика принята максимальная v_{max} и средняя v_{med} составляющие проекции скорости на ось *X*. Измерение скорости осуществляли на расстоянии $2d_{вх}$ от оси тора (рис. 6). Высота

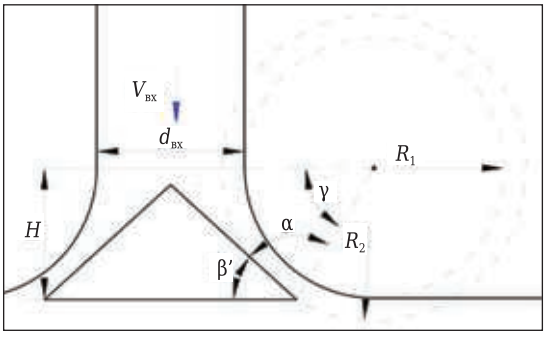

Рис. 5. Основные геометрические характеристики устройства

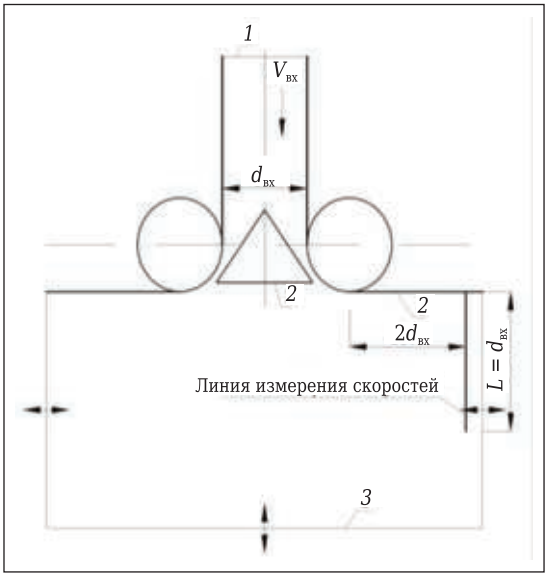

Рис. 6. Граничные условия вычислительного эксперимента: *1* — плоскость входа воздуха; *2* — непроницаемые стенки; *3* — плоскость свободного давления

линии измерения скорости соответствует диаметру подающего патрубка *d*. Для снижения количества факторов эксперимента зависимость для скорости сгруппирована следующим образом

$$v = f\left(\frac{R_1}{R_2}; \frac{\beta'}{\beta}; \gamma\right).$$

В качестве плана эксперимента принят центральный композиционный ортогональный план (ЦКОП). В табл. 1 представлена область факторного пространства выбранного плана эксперимента. Для учета условий работы устройства при разных эксплуатационных характеристиках системы пневмотранспорта замеры повторяли при разных начальных скоростях потока: 5, 15, 25 м/с.

Таблица 1. **Область факторного пространства ЦКОП**

Факторы	Уровни варьирования					Шаг
	–1,287	–1	0	+1	+1,287	
R_1/R_2	0,610	0,65	0,8	0,95	0,99	0,15
β′/β	0,049	0,15	0,5	0,85	0,95	0,35
γ	1,240	11,00	45,0	79,00	88,76	34,00

ПРОМЫШЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Согласно схеме (рис. 7), принятой на предприятии, один рукавный фильтр обслуживает блок силосов. На верхней отметке каждого блока железобетонных силосов установлены рукавные фильтры ФРКН-180 с вентиляторами ВДН-9у. Суммарная производительность двух аспирационных установок составляет Q = 24000 м^3/ч, что обеспечивает работу фильтров с удельной газовой нагрузкой 1,0 м^3/(м^2·мин) (допустимая нагрузка составляет 1,7 м^3/(м^2·мин)), при загрузке силосов от трех цементных мельниц и одновременной выгрузке из всех восьми силосов. Сброс уловленной пыли осуществляется непосредственно в силос. Характеристика склада хранения цемента приведена в табл. 2.

Разработанное устройство (рис. 8) состоит из короба, образованного верхней *1* и нижней *2* частями, например трубами различного диаметра, соединенными между собой подвижным соединением (например, телескопическим) для обеспечения возможности перемещения верхней части и фиксации в промежуточных положениях, и крышки *3*, которая неподвижно (например, фланцевым соединением) прикреплена к верхней части короба. К крышке жестко (например, сваркой) прикреплен патрубок *4* для подачи пылевоздушной смеси, а также прикреплен стержень *5*, ко второму концу которого жестко прикреплен разделитель потока *6*. К нижней кромке нижней *2* части короба жестко прикреплен обтекатель *7*, выполненный в виде тела вращения.

Предварительно устройство монтируется в загрузочный проем бункера. При этом крышка

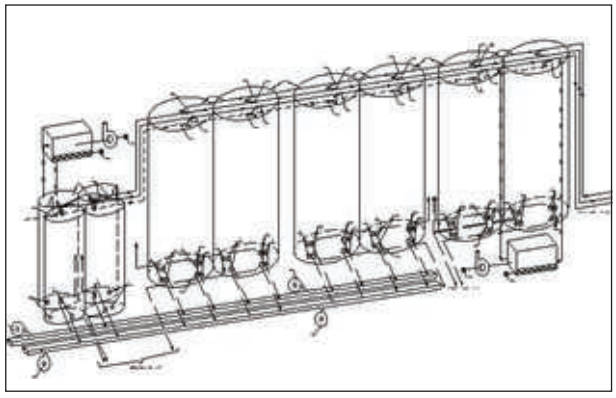

Рис. 7. Схема силосного склада цементного завода

Таблица 2. **Характеристика склада хранения цемента**

Номер силоса	Количество часов работы в год	Характеристика источника (трубы)		Характеристика выбросов			Характеристика установки обеспыливания				Выбросы (неорганическая пыль (пыль цемента) 70–20 % SiO_2)			
		высота, м	диаметр, м	скорость, м/с	объем м^3/с	температура, °С	тип	коэффициент обеспыливания	степень очистки, %		г/с	мг/м^3	т/год	валовый выброс по источнику, т/год
									средняя	максимальная				
1–6	8300	21	0,5	9,48	1,86	30	ФРКИ-180	100	98,8	99,5	0,41	220,43	11,414	11,414
7–10	200	21	0,5	14,43	2,831	19	ФРКИ-180	100	95,7	99,5	1,83	646,4	1,3176	–
	300										1,021	360,65	1,1026	–
											1,83	646,4	–	2,4202
11–14	6920	21	0,5	13,94	2,736	40	ФРКИ-180	100	98,6	99,5	0,33	120,6	6,265	6,265
16	3460	20	1	2,41	1,88	28	6 ЦН-15, ФРКИ-180	100	99	99,8	0,505	269,6	3,334	3,334
17	3360	20	1	3,71	2,94	38	6 ЦН-15, ФРКИ-180	100	99	99,8	0,598	203,4	5,737	–
	100										0,58	197,3	0,1656	–
											0,598	203,4	–	–

3 посредством патрубка *4* для подачи пылевоздушной смеси соединяется с трубопроводом системы пневмотранспорта. Затем осуществляется настройка устройства путем вертикального перемещения нижней *2* части короба вместе с закрепленным на ней обтекателем *7* относительно неподвижных крышки *3*, верхней *1* части, стержня *5* и разделителя потока *6*. Исходя из расхода воздуха, а также вида, плотности и крупности сыпучего материала выбирается оптимальная величина зазора между обтекателем *7* и разделителем потока *6*, обеспечивающая наибольший угол отклонения потока при исключении возможности забивания сыпучим материалом данного зазора. При движении в полости короба пылегазововая смесь, например цементно-воздушная, попадает в зазор между обтекателем *7* и разделителем потока *6*. Сыпучий материал под действием сил инерции перемещается к разделителю потока *6*, что обеспечивает его смещение в периферийную зону потока, облегчая выход частиц из струи. Струя воздуха, вытекая из зазора между обтекателем *7* и разделителем потока *6* с высокой скоростью, увлекает окружающий воздух, но поверхность обтекателя *7* препятствует свободному поступлению воздуха с одной стороны струи, способствуя понижению давления у поверхности обтекателя *7* и прилипанию к ней струи воздуха. Поток сыпучего материала движется в место складирования, а поток газа разворачивается согласно эффекту Коанда и отводится с помощью устройства для отвода газа любой существующей системой аспирации.

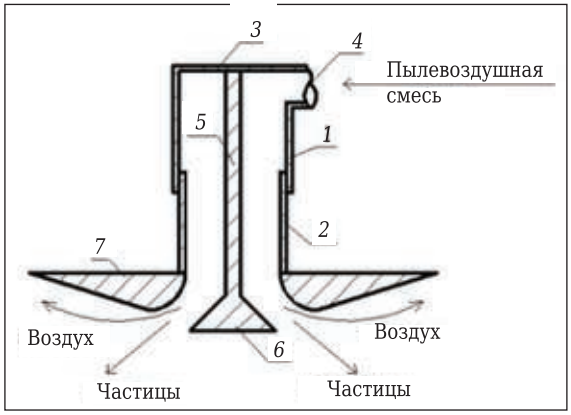

Рис. 8. Модернизированное устройство для снижения пылеобразования при загрузке порошкообразных материалов

* * *

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (постановка задачи и вывод аналитических зависимостей для струйных течений осуществлено в рамках проекта № 18-79-10025, исследование функционирования разработанных конструкций загрузочных устройств в рамках проекта № 21-19-00010).

Библиографический список

1. ***Chan, J.*** Dust suppression of phosphate rock: storage, conveyance and shipping / *J. Chan, J. Cooke, T. Horvath, S. Aziz* // Procedia Engineering. — 2012. — Vol. 46. — P. 213–219.

2. Lü, T. Flow field simulation and structure optimization of confined hood at transshipment point of coal conveyor belt / *T. Lü, S. Che, C. Guo, X. Wang* // Chinese Journal of Environmental Engineering. — 2013. — Vol. 7, № 7. — P. 2667–2671.

3. ***Cao, W.*** The inverse optimization of exhaust hood by using intelligent algorithms and CFD simulation / *W. Cao, X. You* // Powder Technology. — 2017. — Vol. 315. — P. 282–289.

4. ***Wang, D.*** Study of airflow induced by regular particles in freefall through tubes / *D. Wang, X. Li* // Advanced Powder Technology. — 2020. — Vol. 31, № 1. — P. 169–180.

5. ***Li, X.*** Model for Induced airflow velocity of falling materials in semi-closed transfer station based on similitude theory / *X. Li, Q. Li, D. Zhang* [et al.] // Advanced Powder Technology. — 2015. — Vol. 26, № 1. — P. 236–243.

6. ***Wang, Y.*** Experimental study of flow regimes and dust emission in a free falling particle stream / *Yi Wang, Xiaofen Ren, Jiangping Zhao* [et al.] // Powder Technology. — 2016. — Vol. 292. — P. 14–22.

7. ***Plinke, M. A. E.*** Dust generation from handling powders in industry / *M. A. E. Plinke, D. Leith, M.G. Boundy, F. Löffler* // Am. Ind. Hyg. Assoc. J. — 1995. — Vol. 56. — P. 251–257.

8. ***Li, Xiaochuan***. Developments in studies of air entrained by falling bulk materials / *Xiaochuan Li, Qili Wang, Qi Liu, Yafei Hu* // Powder Technology. — 2016. — Vol. 291, № 4. — P. 159–169.

9. ***Logachev, I. N.*** Methods and means of reducing the power requirements of ventilation systems in the transfer of free-flowing materials / *I. N. Logachev, K. I. Logachev, O. A. Averkova* // Refract. Ind. Ceram. — 2013. — Vol. 54, № 3. — P. 258–262.

Логачёв, И. Н. Способы и средства снижения энергоемкости аспирационных систем при перегрузке сыпучих материалов / *И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова* // Новые огнеупоры. — 2013. — № 6. — С. 66–70.

10. ***Ansart, R.*** Dust emission in powder handling: free falling particle plume characterization / *R. Ansart, A. Ryck, J. A. Dodds* // Chemical Engineering Journal. — 2009. — Vol. 152, № 2/3. — P. 415–420.

11. ***Wypych, P.*** Controlling dust emissions and explosion hazards in powder handling plants / *P. Wypych, D. Cook, P. Cooper* // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. — 2005. — Vol. 44, № 2. — P. 323–326.

12. ***Logachev, I. N.*** Refining the method for determining the flow rate of air entrained by freely falling polydisperse loose material / *I. N. Logachev, E. N. Popov, K. I. Logachev, O. A. Averkova* // Powder Technology. — 2020. — Vol. 373. — P. 323–335.

13. ***Li, X.*** Nonlinear variation influence factors for induced airflow of bulk materials in transfer station. Fenmo Yejin Cailiao Kexueyu Gongcheng / *X. Li, Q. Li, D. Zhang* [et al.] // Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy. — 2014. — Vol. 19, № 4. — P. 508–513.

14. ***Ansart, R.*** Dust emission by powder handling: comparison between numerical analysis and experimental results / *R. Ansart, A. Ryck, J. A. Dodds* [et al.] // Powder Technology. — 2009. — Vol. 190, № 1/2. — P. 274–281.

15. ***Liu, Z.*** Dust generation and air entrainment in bulk materials handling — a review / *Z. Liu, P. Wypych, P. Cooper* // Powder Handling and Processing. — 1999. — Vol. 11, № 4. — P. 421–425.

16. ***Averkova, O. A.*** Air ejection by a flux of particles of a bulk material in a vertical porous pipe with a bypass cylindrical chamber / *O. A. Averkova, I. N. Logachev, K. I. Logachev* // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. — 2015. — Vol. 88, № 4. — P. 839–853.

17. *Averkova, O. A.* Analytical and experimental study of the air recirculation in a loading porous tube with a combined bypass chamber / *O. A. Averkova, I. V. Kryukov, I. N. Logachev, K. I. Logachev* // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. — 2017. — Vol. 90. — P. 318–328.

18. ***Ovsyannikov, Y. G.*** Reducing the power consumption of ventilation systems through forced recirculation / *Yu. G. Ovsyannikov, A. B. Gol'tsov, A. S. Seminenko* [et al.] // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 57. — P. 557–561.

Овсянников, Ю. Г. Снижение энергоемкости аспирационных систем за счет принудительной рециркуляции / *Ю. Г. Овсянников, А. Б. Гольцов, А. С. Семиненко, К. И. Логачёв, В. А. Уваров* // Новые огнеупоры. — 2016. — № 10. — С. 64–68.

19. ***Xiao, Di.*** Investigation of the dust control performance of a new transverse-flow air curtain soft-sealing system / *Di Xiao, Xiaochuan Li, Zhenchang Fang* [et al.] // Powder Technology. — 2020. — Vol. 362. — P. 238–245. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.091.

20. ***Xiao, Di.*** Experimental investigation and numerical simulation of small-volume transverse-flow air curtain performances / *Di Xiao, Xiaochuan Li, Weidong Yan, Zhenchang Fang* // Powder Technology. — 2019. — Vol. 352. — P. 262–272.

21. ***Вулис, Л. А.*** Теория струй вязкой жидкости / *Л. А. Вулис, В. П. Кашкаров.* — М. : Наука, 1965. — 431 с. ■

Получено 24.10.20
© А. С. Семиненко, К. И. Логачёв, А. Б. Гольцов, О. А. Аверкова, 2021 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

12-я Международная конференция по нанонауке, нанотехнологиям и перспективным материалам (IC2NAM2021)

26–27 марта 2021 г.
Тайпей, Тайвань

IC2NAM --- это престижная конференция, организованная для предоставления отличной международной платформы для ученых, исследователей, инженеров, работников промышленных предприятий, а также подающих надежды студентов всего мира, для обмена, знаниями и результатами исследований с мировыми экспертами.

http://iser.co/Conference2021/Taiwan/1/IC2NAM/