

Семенов А.С., ст. препод.,  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## СНИЖЕНИЕ ПЫЛЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ПНЕВМОТРАНСПОРТНОЙ ЗАГРУЗКЕ Порошкообразных материалов

seminenko.as@bstu.ru

*При загрузке технологических емкостей (бункеров) основным условием пылеобразования является взаимодействие загружаемого потока с преградой (удар падающего материала о дно бункера, о слой ранее складированного (уложенного) материала и т.д.). Основные факторы, влияющие на интенсивность пылеобразования можно разбить на три группы: конструктивные характеристики бункерных хранилищ; технологические параметры перегрузки; физико-механические свойства сыпучего материала. Интенсивность распространения облака взвешенной пыли зависит от состояния воздушной среды вблизи источника пылеобразования, которое в свою очередь зависит от количества энергии, вносимой падающим материалом. Данная работа посвящена снижению пылеобразования при пневмотранспортной загрузке порошкообразных материалов за счет использования разработанного загрузочного устройства. Приведены результаты промышленных испытаний предлагаемого технического решения в условиях загрузки цементного силоса.*

**Ключевые слова:** пылеобразование, эффект Коанда, Coanda effect, загрузка бункеров, аэродинамика.

**Введение.** При загрузке технологических емкостей (бункеров) основным условием пылеобразования является взаимодействие загружаемого потока с преградой (удар падающего материала о дно бункера, о слой ранее складированного (уложенного) материала и т.д.). Процессам пылеобразования посвящено значительное количество научно-исследовательских трудов, в частности установлению условий и последствий образования пыли при перегрузках посвящены работы Бобровникова Н.А. [1], Ларина Ю.А. [2], Логачева И.Н. [3, 4], Минко В.А. [5], Самсонова В.Т. [6], Сервацка З. [7], в которых выделены следующие особенности процесса: взаимодействие падающего материала с преградой; динамическое взаимодействие потока ускоренно падающего потока сыпучего материала и окружающей среды; эжекционная способность потока падающего материала; азрирование падающего потока материала; влияние влажности сыпучего материала на его пылеобразующую способность; оседание частиц пыли. Этому явлению посвящено существенное число работ, учитывающих частные условия перегрузок: при работе конвейеров ленточного типа [3–5, 8–9], грейферных кранов [10–11], а также при различных условиях взаимодействия падающего сыпучего материала (из трубопроводов пневмотранспортных установок или лент конвейеров) и преграды (дно технологических емкостей: бункера, вагона, трюма) [1, 6–7, 11–12] и т.д.

**Методология.** Для повышения эффективности работы системы вентиляции, обеспечивающей снижение пылевых выбросов из бункеров разработано устройство для снижения пылеоб-

разования при загрузке сыпучих материалов. Подтверждение работоспособности, которого необходимо выполнить экспериментально.

**Основная часть.** В работах [13–14] интенсивность пылеобразования, характеризующаяся концентрацией  $g$  (мг/с) пыли при взаимодействии материала с преградой в общем случае выражается:

$$g = f \left( E, \frac{v_k}{v_n}, Q_e, d, W \right), \quad (1)$$

где  $E$  – кинетическая энергия взаимодействия материала и преграды;  $\frac{v_k}{v_n}$  – отношение конечной и начальной скоростей материала;  $Q_e$  – количество эжектируемого воздуха;  $d$ ,  $W$  – характерный размер и влажность материала.

В работе [15] рассмотрено явление вертикального распределения концентрации  $g_h$  (мг/м<sup>3</sup>) пыли по высоте:

$$g_h = g_0 \exp(-n), \quad (2)$$

где  $g_0$  – концентрация пыли в месте удара материала и преграды, приводящего ко взмётыванию материала;  $n$  – коэффициент распределения концентрации материала.

Эжектируемый расход воздуха  $Q_э$  (м<sup>3</sup>/ч) при падении свободной струи, согласно работе [13], определяется из выражения

$$Q_э = Q_0 + Q_m, \quad (3)$$

где  $Q_0$  – начальный расход воздуха в транспортирующем потоке, м<sup>3</sup>/ч;  $Q_m$  – расход воздуха,

увлекаемого материалом, м<sup>3</sup>/ч. Величины  $Q_0$  и  $Q_m$  определяются из выражений:

$$Q_0 = l \cdot q_g, \quad (4)$$

$$Q_m = v_g \cdot F \cdot 3600, \quad (5)$$

где  $l$  – характерная геометрическая характеристика поверхности потока;  $q_g$  – удельный расход воздуха, приходящийся на 1 м поверхности потока;  $v_g$  – скорость воздуха;  $F$  – площадь поперечного сечения потока материала.

Отметим, что величины, входящие в уравнения (4) и (5) определяются по таблицам, данные для которых получены экспериментально, на моделях, как правило, в лабораторных условиях. Подобие (адекватность) моделируемых и натуральных процессов пылеобразования определяется критериями, основанными на теории размерностей и подобия, что характерно для физического моделирования. Они (методы) рассматриваются как приближенные, однако их значимость увеличивается при решении поисковых задач, когда структура и состав уравнений, описывающих процесс, не полны или не надежны. К числу таких задач относится пылеобразование при перегрузках порошкообразных материалов.

При физическом моделировании определяются факторы (физические параметры), позволяющие устанавливать подобие процессов, протекающих в условиях модель – натура при различных пропорциональных характеристиках. Качественные и количественные связи подобных явлений устанавливают в виде критериев подобия (укрупненных множителей основных физических параметров процессов). В соответствии с первой теоремой подобия численное равенство критериев подобия является необходимым условием подобия объектов [16–17].

В работе [2] указывается: «количество пыли, выделяющееся при свободном падении измельченного материала, зависит от расхода этого материала, его дисперсности, высоты падения и скорости организованного потока воздуха». Принятые автором критерии подобия предполагают использование в модельных исследованиях не основной материал, перегружаемый в том или ином производстве, а подобный натурному, т.е. его характеристики также должны соответствовать условию подобия. Такой подбор модельного объекта перегрузки связан с дополнительными исследованиями.

При определении скорости взметывающихся потоков необходимо учитывать результаты исследований [6] в которых принято, что скорость потоков воздуха, образованных при ударе

материала о преграду, будет близка к скорости свободного падения при столкновении с преградой. Самсонов В.Т. указывает: «основной причиной пылеобразования при падении сыпучего материала является резкое уменьшение его пористости при встрече с преградой. Это приводит к образованию потоков воздуха, которыми и взвешиваются пылевидные частицы и распространяются в плоскости удара» [6]. При этом в качестве основных критериальных условий принимается геометрическое подобие модели и природы, а также критерий Фруда, отражающий соотношение инерции и сил тяжести для пылевоздушных потоков.

Известно исследование [2], посвященное оценке пылеобразования в результате соударения пневмотранспортного потока загружаемого материала и преграды в условиях загрузки судовых трюмов. Автор этой работы выделил три фазы процесса пылеобразования, аналитически определив концентрации пылевых потоков для каждой из них. Работа [2] основана на модельных исследованиях, в качестве условий подобия приняты геометрическое подобие и критерий Фруда. Однако использован натуральный сыпучий материал, что является нарушением модельного исследования принципа подобия явлений. Поэтому результаты исследований можно считать поисковыми, и требуют количественной оценки процесса пылеобразования в натуральных условиях.

Таким образом, основные рекомендации проведения модельного физического экспериментального исследования процессов пылеобразования при работе пневмотранспортных систем можно сформулировать так: выполнение модели геометрически подобной натурному объекту; использование натурального материала; соблюдение условий подобия падения и истечения материала в модели и натуре; соблюдение условий подобия взаимодействия пневмотранспортного потока о преграду, взметывания пылевых частиц в натуре и модели [18]; соблюдение численно равных скоростей потоков.

В соответствии с данными исследованиями, основные факторы, влияющие на интенсивность пылеобразования можно разбить на три группы: конструктивные характеристики бункерных хранилищ; технологические параметры перегрузки; физико-механические свойства сыпучего материала.

Интенсивность распространения облака взвешенной пыли зависит от состояния воздушной среды вблизи источника пылеобразования, которое в свою очередь зависит от количества энергии, вносимой падающим материалом.

Значительное влияние на интенсивность пылеобразования оказывают технологические параметры перегрузки: начальная степень истечения, расход материала и транспортирующего воздуха, эжекционное давление, степень запол-

нения бункера. В таблице 1 приведены параметры выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от склада хранения цемента цементного завода ЗАО «Белгородский цемент».

Таблица 1

### Параметры выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от склада хранения цемента

№ силоса	кол-во часов работы в год	характеристика источника			характеристика выбросов			характеристика обеспыливающей установки				выбросы				
		источник выброса	высота источника, м	Диаметр, м	Скорость, м/с	Объем, м <sup>3</sup> /с	Температура, °С	тип газоочист. установок	коэф. обесп. газоочист., %	средняя степень очистки, %	макс. степень очистки, %	загрязняющее в-во	г/с	мг/м <sup>3</sup>	т/год	валовый выброс по источнику, т/год
1-6	8300	труба	21	0,5	9,48	1,86	30	ФРКИ-180	100	98,8	99,5	пыль неорганическая 70-20 % SiO <sub>2</sub>	0,41	220,43	11,414	11,414
7-10	200	труба	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	
11-14	6920	труба	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	труба	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	труба	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		5,9026

Конструктивные характеристики бункерных хранилищ (геометрические характеристики бункеров, загрузочных устройств и т.п.) также вносят вклад на условия пылеобразования. 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 предусматри-

вать возможность организации воздухораспределения в полости бункера [19–20].

Конструкция загрузочного узла модернизирована в соответствии с разработанным и запатентованным устройством для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих материалов [21]. Техническое решение для цементного силоса приведено на рисунке 1.

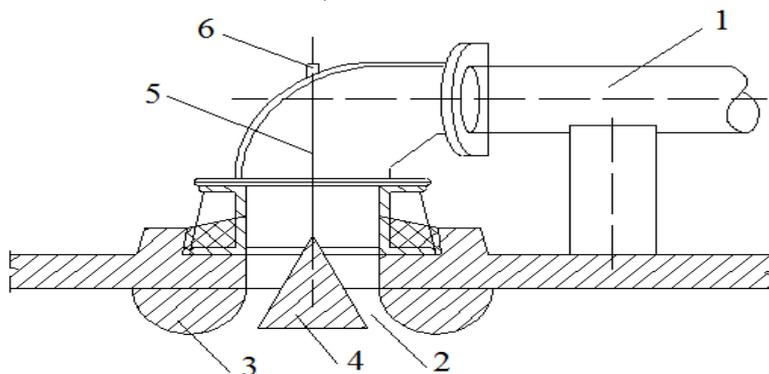


Рис. 1. Конструкция загрузочного узла цементного бункера:  
1 – трубопровода системы пневмотранспорта, 2 – сопло, 3 – обтекатель (тор),  
4 – разделитель потока (конус), 5 – стрелка, 6 – контргайка

Конструкция предлагаемого устройства обеспечивает разделение пневмотранспортного потока на составляющие: сыпучий материал, направляемый в место складирования, а также воздушный поток, который согласно эффекта Коанда, изменяет свое направление и движется у крышки бункера. Что обеспечивает снижение пылеобразование при контакте с ранее складированным (уложенным) материалом, а соответственно и концентрацию пылевых частиц в аспирационном воздухе.

Устройство для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих веществ прошло промышленные испытания в условиях загрузки силоса № 11, входящего в группу их 4-х бункеров цементного завода ЗАО «Белгородский цемент». В таблице 2 приведены результаты замеров запыленности аспирационного воздуха перед и после рукавного фильтра до и после установки предлагаемого устройства.

Таблица 2

### Результаты замеров запыленности воздуха промышленного эксперимента

Параметры замера	температура, °С	разрежение, мм. в. ст.	кол-во аспирационного воздуха, м <sup>3</sup> /ч	подсосы, %	запыленность, мг/Нм <sup>3</sup>	кол-во пыли в аспирационном воздухе, г/с	степень очистки, %
перед рукавным фильтром	49	64	10527,322	5,05	8998,016	22,202	98,8
после рукавного фильтра	44	108	10840,952		102,713	0,266	
замеры с предлагаемым устройством:							
перед рукавным фильтром	47	63	10625,548	7,09	5886,50	14,660	98,6
после рукавного фильтра	43	109	11002,224		78,019	0,205	

Представленные результаты промышленных испытаний доказывают работоспособность способа повышения эффективности работы системы обеспыливающей вентиляции при пневмотранспортной загрузке сыпучих материалов в бункер. Предлагаемое устройство [21] обеспечивает снижение концентрации пылевых частиц в аспирационном воздухе до рукавного фильтра. При этом, несмотря на некоторое снижение степени очистки пылеочистного оборудования, концентрация загрязняющих веществ в атмосферу от рассматриваемого источника также снижается, что обеспечивает экологический и экономический эффект для предприятия и общества.

**Выводы.** В ходе проведения аналитических исследований были выявлены основные факторы, влияющие на пылеобразование при загрузке сыпучих материалов в технологические емкости (бункера). Предложенное устройство для снижения пылеобразования обеспечивает разделение потоков сыпучего материала и транспортирующего воздуха. В результате чего снижается количество вносимой энергии падающим потоком и уменьшается количество взмываемого материала. Проведены промышленные испытания предлагаемого устройства, подтверждающие его работоспособность.

**Источник финансирования.** РФФИ (код проекта 16-08-00074 а); Программа развития

опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бобровников Н.А. Защита окружающей среды от пыли на транспорте. Москва: Транспорт, 1984.
2. Ларин Ю.А. Исследование методов борьбы с пылеобразованием при погрузке порошкообразных материалов в трюмы судов, Ленинград, дис. канд. техн. наук: 05.22.19 1973.
3. Логачев И.Н., Логачев К.И. Аэродинамические основы аспирации: монография. Санкт-Петербург: Химиздат, 2005. 659 с.
4. Логачев И.Н., Логачев К.И., Аверкова О.А. Энергосбережение в аспирации: монография. М.: РХД, 2013. 504 с.
5. Минко В.А., Логачев И.Н., Логачев К.И., Аверкова О.А., Шумилов Р.Н., Ильина Т.Н., Староверов С.В., Феоктистов А.Ю., Феоктистов Ю.А., Шаптала В.Г. и др. Обеспыливающая вентиляция. Т. 2. Белгород: БГТУ, 2010. 565 с.
6. Самсонов В.Т. Обеспыливание воздуха в промышленности: методы и средства: монография. Москва: ИНФРА-М, 2016. 234 с.
7. Сервацка З. Отдельные рекомендации по предотвращению пыления массовых сыпучих грузов // Научные труды Морской институт ПНР. 1981. Т. 662. С. 142 - 149.

8. Сухарева А.И. Вентиляция и пневмотранспорт в полиграфии. Москва: Книга, 1971. 30 с.
9. Logachev I.N., Logachev K.I., Averkova O.A., Kryukov I.V. Methods of Reducing the Power Requirements of Ventilation Systems. Part 1. Derivation of Hydrodynamic Equations of Air Ejection by a stream of Free-Flowing Material in a Perforated Trough with Bypass Chamber // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2014. №1. Pp 70–75.
10. Отделкин Н.С., Отделкин М.С. Прогнозирование пылеобразования при перегрузке пылящих материалов грейферными кранами на основе подобия и моделирования // *Научные труды Горьковского института инженерного водного транспорта*. 1999. Т. 283. № 4. С. 108–116.
11. Отделкин Н.С. Прогнозирование пылеобразования при различных способах перегрузки пылящих навалочных материалов в морских и речных портах // *Вестник Волжская гос. академия водн. трансп. «Надежность и ресурс в машиностроении»*. 2003. Т. 4. С. 107–120.
12. Степанов А.Л. Портовое перегрузочное оборудование. Москва: Транспорт, 1996. 328 с.
13. Обухов А.М. О распределении энергии в спектре турбулентного потока // *«Изв. АН СССР»*: Серия географическая и геофизическая, 1941. № 4-5.
14. Hinds W.C. Size characteristics of cigarette smoke // *American Industrial Hygiene Association Journal*. 1978. Vol. 38. №. 1. Pp. 48–54.
15. Vu Duc. Measurements of pollutants emitted during manual arc welding with coated electrodes in an experimental chamber // *Staub*. 1983. Vol. 43. №. 2. Pp. 55–57.
16. Кирпичев М.В. Теория подобия. Москва: Академия наук СССР, 1953. 182 с.
17. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. Москва: Гостехиздат, 1981. 375 с.
18. Logachev K.I., Averkova O.A., Kryukov I.V. Simulation of air flows in ventilation shelters with recirculation // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2015. №4. Pp. 428–434.
19. Семиненко А.С., Логачев И.Н. Снижение пылеобразования при загрузке бункеров сыпучими материалами // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2006. № 14. С. 251–254.
20. Logachev I.N., Logachev K.I. Industrial air quality and ventilation: controlling dust emissions. BocaRaton: CRC Press, 2014. Pp. 417.
21. Патент РФ 48318 Логачев И.Н., Овсянников Ю.Г., Семиненко А.С., Никитенко Б.Л. Устройство для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих материалов. Патент на полезную модель Заявка: №2005117396/22,06.06.2005; Опубл. 10.10.2005, Бюл. № 28.

*Информация об авторах*

**Семиненко Артем Сергеевич**, старший преподаватель кафедры теплогаснабжения и вентиляции.

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

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

---

*Поступила в февраль 2018 г.*

© Семиненко А.С., 2018

---

**A.S. Seminenko**

**EXPERIMENTAL INSTALLATIONS FOR DETERMINING CONDITIONS OF COANDA FLOWS IMPLEMENTATION**

*When loading process bunkers, the main condition for dust formation is the interaction of a feed flow with the obstacle (impact of the falling material on the bottom of the hopper, a layer of the previously stored material, etc.). The main factors influencing the intensity of dust formation can be divided into three groups: the structural characteristics of bunker storage facilities; technological parameters of the overload; physical and mechanical properties of bulk material. The intensity of propagation of a suspended dust cloud depends on the state of air environment near the dust source, which in its turn depends on the amount of energy introduced by the falling material. This paper deals with reducing the dust generation during pneumatic transport of powdered materials through the use of a developed loading device. The results of industrial tests of the proposed technical solution in conditions of loading the cement silo are given.*

**Keywords:** dust formation, aerodynamics, bunker loading, Coanda effect, Coanda flow

---

## REFERENCES

1. Bobrovnikov N.A. Zashchita okruzhaiushchei` sredi` ot py`li na transporte. Moskva: Transport, 1984.
2. Larin Iu.A. Issledovanie metodov bor`by` s py`leobrazovaniem pri pogruzke poroshkoobrazny`kh materialov v triumy` sudov, Leninograd, dis. kand. tekhn. nauk: 05.22.19 1973.
3. Logachev I.N., Logachev K.I. Ae`rodynamicheckie osnovy` aspiratsii: monografiia. Sankt-Peterburg: Himizdat, 2005, 659 p.
4. Logachev I.N., Logachev K.I., Averkova O.A. E`nergoberezhenie v aspiratsii: monografiia. M.: RKHD, 2013, 504 p.
5. Minko V.A., Logachev I.N., Logachev K.I., Averkova O.A., Shumilov R.N., Il`ina T.N., Staroverov S.V., Feoktistov A.Iu., Feoktistov Iu.A., Shaptala V.G. i dr. Obespy`livaushchaia ventilatsiia. T. 2. Belgorod: BGTU, 2010, 565 p.
6. Samsonov V.T. Obespy`lvanie vozduha v promy`shlennosti: metody` i sredstva: monografiia. Moskva: INFRA-M, 2016. 234 p.
7. Servatcka Z. Otdel`ny`e rekomendatsii po predotvrashcheniiu py`leniia massovy`kh sy`puchikh gruzov // Nauchny`e trudy` Morskoj` institut PNR, 1981, vol. 662, pp. 142–149.
8. Suhareva A.I. Ventilatsiia i pnevmotransport v poligrafii. Moskva: Kniga, 1971, 30 p.
9. Logachev I.N., Logachev K.I., Averkova O.A., Kryukov I.V. Methods of Reducing the Power Requirements of Ventilation Systems. Part 1. Derivation of Hydrodynamic Equations of Air Ejection by a stream of Free-Flowing Material in a Perforated Trough with Bypass Chamber // Refractories and Industrial Ceramics, 2014, no. 1, pp. 70–75.
10. Otdelkin N.S., Otdelkin M.S. Prognozirovanie py`leobrazovaniia pri peregruzke py`liashchikh materialov grei`fery`mi kranami na osnove podobiiia i modelirovaniia // Nauchny`e trudy` Gor`kovskogo instituta inzhenernogo vodnogo transporta, 1999, vol. 283, no. 4, pp. 108–116.
11. Otdelkin N.S. Prognozirovanie py`leobrazovaniia pri razlichny`kh sposobakh peregruzki py`liashchikh navalochny`kh materialov v morskikh i rechny`kh portakh // Vestneyk Volzhskaia gos. akademiia vodn. transp. «Nadezhnost` i resurs v mashinostroenii», 2003, vol. 4, pp. 107–120.
12. Stepanov A.L. Portovoe peregruzochnoe oborudovanie. Moskva: Transport, 1996. 328 p.
13. Obuhov A.M. O raspredelenii e`nergii v spektre turbulentnogo potoka // «Izv. AN SSSR»: Seriia geograficheskaiia i geofizicheskaiia, № 4-5, 1941.
14. Hinds W.C. Size characteristics of cigarette smoke // American Industrial Hygiene Association Journal, 1978, vol. 38, no. 1, pp. 48–54.
15. Vu Duc. Measurements of pollutants emitted during manual arc welding with coated electrodes in an experimental chamber // Staub, 1983, vol. 43, no. 2, pp. 55–57.
16. Kirpichev M.V. Teoriia podobiiia. Moskva: Akademiia nauk SSSR, 1953. 182 s.
17. Sedov L.I. Metody` podobiiia i razmernosti v mehanike. Moskva: Gostehizdat, 1981. 375 p.
18. Logachev K.I., Averkova O.A., Kryukov I.V. Simulation of air flows in ventilation shelters with recirculation // Refractories and Industrial Ceramics, 2015, no. 4, pp. 428–434.
19. Seminenko A.S., Logachev I.N. Snizhenie py`leobrazovaniia pri zagruzke bunkerov sy`puchimi materialami // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2006, no. 14, pp. 251–254.
20. Logachev I.N., Logachev K.I., Industrial air quality and ventilation: controlling dust emissions. BocaRaton: CRC Press, 2014, pp. 417.
21. Patent RF 48318 Logachev I.N., Ovsiannikov Iu.G., Seminenko A.S., Nikitenko B.L. Ustroistvo dlia snizheniia py`leobrazovaniia pri zagruzke sy`puchikh materialov. Patent na poleznuiu model` Zaiavka: №2005117396/22,06.06.2005; Opubl. 10.10.2005, Biul. no. 28.

*Information about the author*

**Semenenko Artem Sergeevich**, Senior lecturer.

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

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

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

---

*Received in February 2018*