

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 2. Результаты численно-экспериментальных исследований*

По полученным аналитическим зависимостям доказана целесообразность веерной загрузки бункеров порошкообразным сыпучим материалом. Предложена конструкция кольцевого загрузочного устройства, снижающего пылеобразование, использующая эффект Коанда. Численно и экспериментально определены рациональные конструктивно-технологические параметры разработанного устройства.

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

РАСЧЕТ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ

С использованием соотношений (1)–(3), приведенных в части 1 статьи, и уравнения движения пылевых частиц в универсальной математической среде Marle составлены программы расчета полей скоростей воздушных потоков и траекторий частиц. Полученные профили скорости (рис. 1) характеризуют динамику пылевоздушных потоков в полости бункера: значение продольной скорости характеризует пылеобразование при соударении струи падающего материала с преградой, а поперечной скорости — интенсивность эжекции воздуха. Окружная составляющая скорости используется для правильного построения траекторий движения пылевых частиц.

На конечное значение концентрации пылевых частиц в аспирационном воздухе от бункера может повлиять унос материала непосредственно из загрузочной струи.

Сравнение осевых максимальных скоростей при удалении от крышки бункера показало, что пылеобразующая способность веерной струи значительно ниже, чем в случае осесимметричной и плоской струй (рис. 2), что важно для за-

дач совершенствования систем аспирации [1, 2] и обеспыливания при загрузке сыпучих материалов [3, 4] в бункеры силосного типа.

Формирование веерной струи снижает скорость взаимодействия с загруженным материалом, а следовательно, и пылеобразование при загрузке материала. На основании уравнений динамики воздушных потоков построены траектории пылевых частиц [5–8] при загрузке бункера с формированием веерной струи, характеризующие ее сепарационные особенности (рис. 3).

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ УСТРОЙСТВА

Устройство для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих веществ прошло промышленные испытания в условиях загрузки силосного склада цементного завода ЗАО «Белгородский цемент» (табл. 1).

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ

Измерения проводились при 21,3 °С. Результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 2 при начальной скорости потока 5 м/с. Сравнение средних значений скорости с расчетами, выполненными при помощи программного комплекса Solid Works (см. табл. 2), показывает высокую степень их связи. Коэффициент корреляции Пирсона равен $0,998 \pm 0,0029$. Достоверность расчетов подтверждается критерием Стьюдента, равным 0,024, и критерием Фишера, равным 1,47. Хорошая сходимость результатов проведенных вычислительных и лабораторных экспериментов позволяет использовать для дальнейших экспериментальных исследований программный комплекс Solid Works, в соответствии с разработанным планом.

* Часть 1 статьи опубликована в журнале «Новые огнеупоры» № 2 за 2021 г.



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

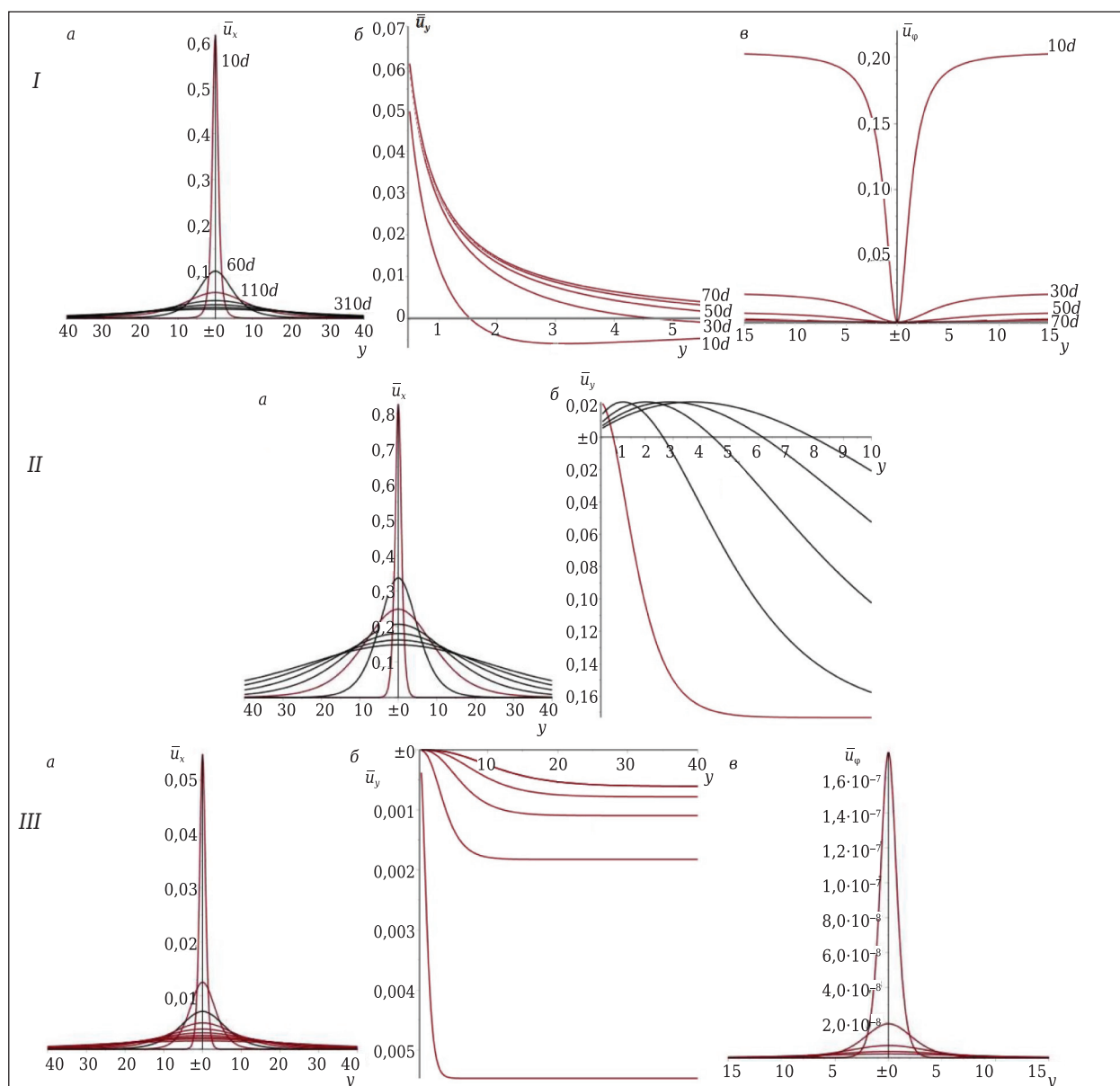


Рис. 1. Поле скоростей воздушной струи при формировании осесимметричной свободной (I), плоской (II) и веерной струи (III) в узле загрузки бункера: а — продольная составляющая скорости; б — поперечная составляющая скорости; в — окружная составляющая скорости

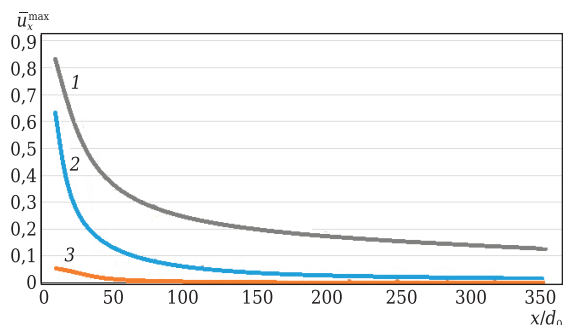


Рис. 2. Изменение осевой скорости струи при удалении от крышки бункера: 1 — плоская струя; 2 — осесимметричная струя; 3 — веерная струя

В табл. 3 представлены основные результаты вычислительного эксперимента при различных начальных скоростях потока.

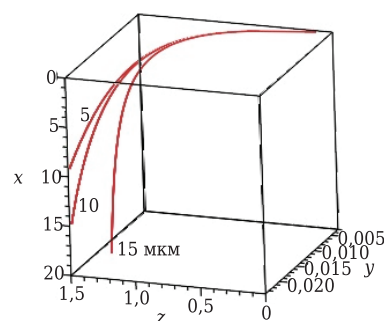


Рис. 3. Траектории пылевых частиц различного диаметра при формировании веерной струи

Максимальное значение составляющей скорости по оси X достигается в эксперименте № 4. Кроме того, эффект налипания воздушной струи

Таблица 1. Результаты промышленных испытаний

Показатель	Характеристика места замера		Замеры с предлагаемым устройством	
	перед рукавным фильтром	после рукавного фильтра	перед рукавным фильтром	после рукавного фильтра
Температура, °С	49	44	47	43
Разрежение, мм вод. ст.	64	108	63	109
Количество аспирационного воздуха, м³/ч	10527,322	10840,952	10625,548	11002,224
Подсосы, %	5,05	5,05	7,09	7,09
Запыленность, мг/(Н·м³)	8998,016	102,713	5886,50	78,019
Количество пыли в аспирационном воздухе, г/с	22,202	0,266	14,660	0,205
Степень очистки, %	98,8	98,8	98,6	98,6

Таблица 2. Результаты экспериментальных исследований

Номер экспери- мента	Скорость, м/с								
	замеры в точках линии измерения скорости					среднее значение по линии измерения скорости	результат численного эксперимента		
	1	2	3	4	5		SolidWorks	уравнения регрессии	
1	4,63	4,54	4,52	3,97	3,27	4,186	4,76	4,205	
2	2,53	1,42	1,21	1,04	0,56	1,352	1,20	1,299	
3	0,91	0,69	0,53	0,51	0,42	0,612	0,64	0,478	
4	0,09	0,23	0,61	1,10	0,73	0,552	0,23	-0,266	

наблюдается в экспериментах № 1, 4, 5, 7, 8, 10 и 13 (см. табл. 3 и рис. 4, а). Устойчивый эффект Коанда в серии экспериментов при скорости $V_{\text{вх}} = 5$ м/с проявляется при $V_{\text{мед}} > 0,13$ м/с и $V_{\text{max}} > 0,36$ м/с.

На рис. 4, б показаны результаты экспериментов, в которых коандовское течение не было сформировано. Геометрические характеристики, соответствующие экспериментам 2, 3, 6, 9, 11, 12, 14, 16, нежелательны при работе исследуемого устройства. В экспериментах 9 и 11 основной поток воздуха устремляется вниз несмотря на то, что в некоторых направлениях от оси входа воздуха происходит налипание, но оно является неустойчивым и хаотичным.

Линии тока и векторы движения воздуха, полученные при моделировании работы исследуе-

мого устройства при различных комбинациях факторов эксперимента (рис. 5), подтверждают существующую теорию коандовских течений: сцепление движущегося потока обеспечивает вовлечение в поток окружающей среды.

Чем выше составляющая скорости на ось X, тем устойчивее налипание струи. В то же время, увеличение скорости воздуха во входном патрубке до 15 м/с и выше приводит к увеличению проекции скорости $V_{\text{мед}}$ и V_{max} на ось X. Налипание струи в экспериментах 9 и 11 не происходит. Имеющееся соотношение конструктивных параметров не обеспечивает формирование условий для проявления эффекта Коанда. В экспериментах 1, 4, 5, 7, 10, 13 данный эффект сохранил свое проявление при скорости во входном патрубке 15 и 25 м/с (рис. 6).

Таблица 3. Факторы и результаты вычислительного эксперимента*

Номер эксперимента	R_1/R_2	β'/β	γ	$V_{\text{вх}} = 5$ м/с		$V_{\text{вх}} = 15$ м/с		$V_{\text{вх}} = 25$ м/с	
				$V_{\text{мед}}$	V_{max}	$V_{\text{мед}}$	V_{max}	$V_{\text{мед}}$	V_{max}
1	0,65	0,15	79	0,30	0,62	0,77	1,89	1,73	3,60
2	0,65	0,15	11	-0,03	0	-0,08	0	-0,17	0
3	0,65	0,85	11	-0,026	0	-0,067	0	-0,12	0
4	0,95	0,85	79	1,54	4,76	4,24	14,51	7,37	26,60
5	0,80	0,50	88,76	0,26	0,70	0,61	1,81	1,12	3,25
6	0,95	0,85	11	0	0,03	0,04	0,17	0,01	0,11
7	0,80	0,50	45	0,13	0,36	0,37	1,04	0,66	1,66
8	0,99	0,50	45	0,63	1,20	1,93	3,61	2,60	5,24
9	0,80	0,95	45	0,07	0,09	0,32	0,74	0,37	0,54
10	0,95	0,15	79	0,31	0,64	0,96	2,05	1,55	3,45
11	0,65	0,85	79	0,08	0,23	0,40	1,23	0,10	0,91
12	0,95	0,15	11	0	0,03	-0,11	-0,01	-0,04	0,11
13	0,80	0,05	45	0,35	0,62	1,07	1,89	2,05	3,14
14	0,61	0,50	45	-0,04	-0,001	-0,12	-0,02	-0,19	-0,02
15	0,80	0,50	45	0,20	0,43	0,56	1,30	0,83	2,17
16	0,80	0,50	1,24	-0,02	0	-0,08	0	-0,11	0

* V_{max} — максимальная скорость V_x в плоскости измерения; $V_{\text{мед}}$ — средняя скорость V_x в плоскости измерения. Жирным шрифтом выделены результаты экспериментов, в которых произошло налипание струи, что характеризует изменение направления движения струи, согласно эффекту Коанда.

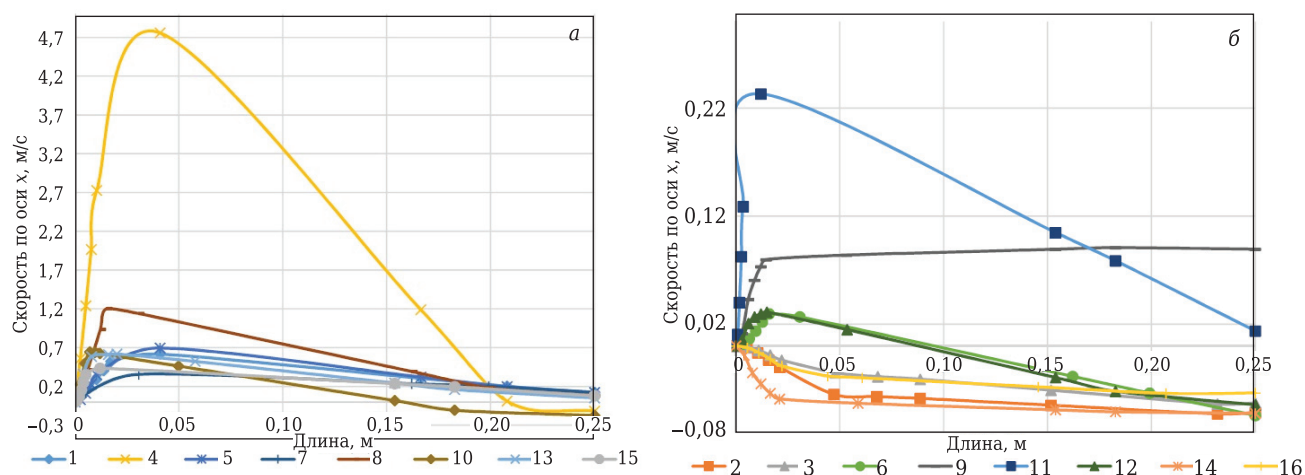


Рис. 4. Профили скоростей на измеряемой линии при $V_{\text{вх}} = 5$ м/с, построенные по результатам экспериментов с налипанием струи (а) и при отсутствии налипания струи (б)

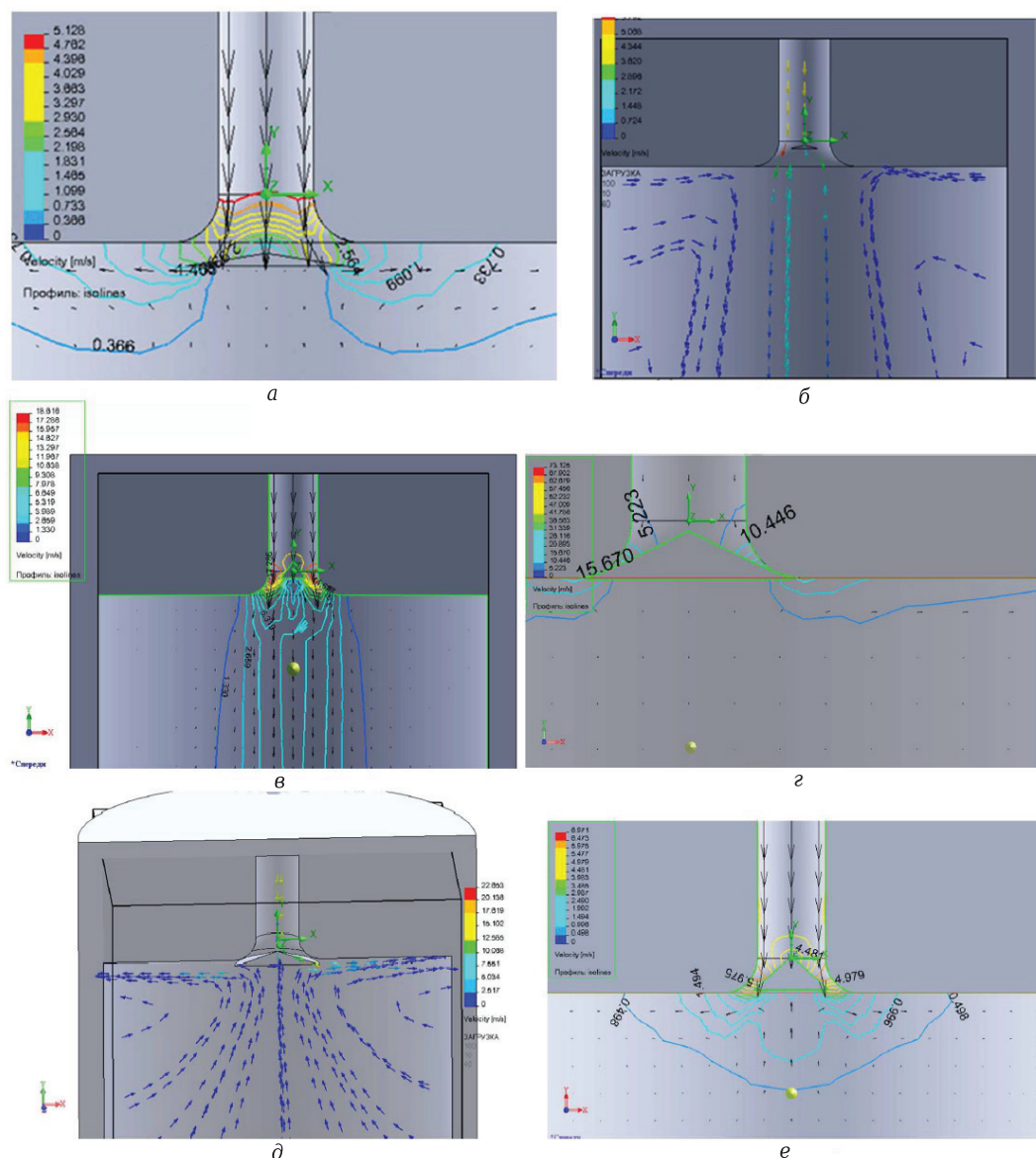


Рис. 5. Линии тока и векторы движения воздуха, полученные при $V_{\text{вх}} = 5$ м/с в экспериментах № 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д) и 7 (е)

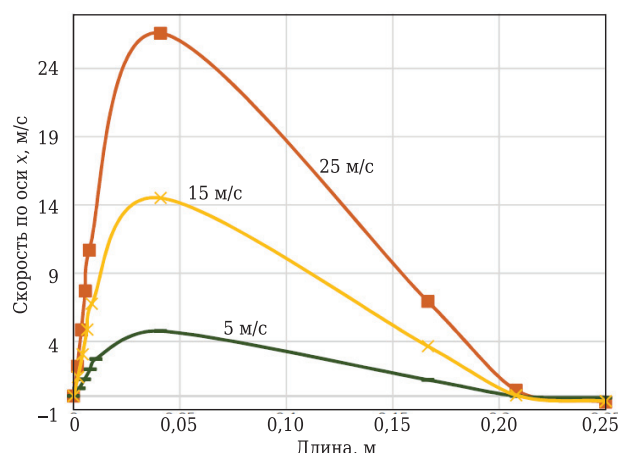


Рис. 6. Профили скоростей на измеряемой линии в эксперименте № 4 при разных V_{bx} (указаны на кривых)

Можно выделить три типа струи: налипающая на верхнюю стенку (эксперименты 1, 4, 5, 7, 8, 10, 13, 15), наклонная (эксперимент 11) и направленная вертикально вниз (эксперименты 2, 3, 6, 9, 12, 14, 16). Результаты данных исследований полезны для проектирования вентиляционных систем с использованием струйных воздушных течений [11–13].

УРАВНЕНИЯ РЕГРЕССИИ

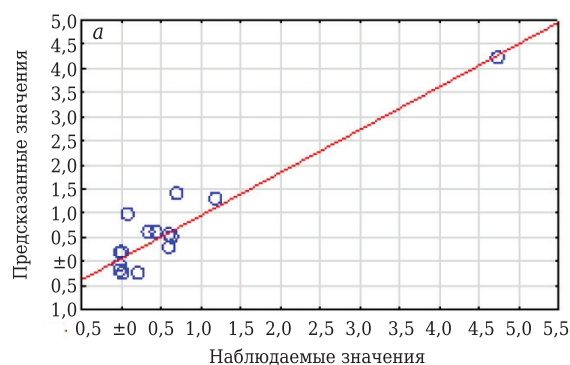
Для выявления рационального соотношения конструктивно-режимных параметров, обеспечивающих создание эффекта Коанда, получены следующие уравнения регрессии:

– при скорости $V_{bx} = 5$ м/с

$$V_{med} = -0,2576 + 0,42235 \cdot (R_1/R_2) + 0,60082 \cdot (\beta'/\beta) + 0,01460 \cdot \gamma - 1,139 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) - 0,0163 \cdot (R_1/R_2) \cdot \gamma - 0,0709 \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma + 0,10182 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma,$$

Таблица 4. Ведомость расчета коэффициента детерминации

Параметр	V_{med}	V_{max}	Параметр	V_{med}	V_{max}
Множест. — R	0,94	0,94	MS — Модель	0,29	2,57
Множест. — R_2	0,88	0,89	SS — Остаток	0,27	2,29
Скоррект — R_2	0,78	0,79	сс — Остаток	8	8
SS — Модель	2,06	17,96	MS — Остаток	0,034	0,286
сс — Модель	7	7	F	8,61	8,97
			p	0,003	0,003



$$V_{max} = -0,0713 + 0,43151 \cdot (R_1/R_2) + 1,7860 \cdot (\beta'/\beta) + 0,03714 \cdot \gamma - 3,474 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) - 0,0479 \cdot (R_1/R_2) \cdot \gamma - 0,2135 \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma + 0,31583 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma;$$

– при скорости $V_{bx} = 15$ м/с

$$V_{med} = -0,3388 + 0,65404 \cdot (R_1/R_2) + 0,87675 \cdot (\beta'/\beta) + 0,02590 \cdot \gamma - 2,054 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) - 0,0261 \cdot (R_1/R_2) \cdot \gamma - 0,1680 \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma + 0,24601 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma,$$

$$V_{max} = 0,16692 + 0,73182 \cdot (R_1/R_2) + 4,4479 \cdot (\beta'/\beta) + 0,09785 \cdot \gamma - 9,111 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) - 0,1276 \cdot (R_1/R_2) \cdot \gamma - 0,6029 \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma + 0,90616 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma;$$

– при скорости $V_{bx} = 25$ м/с

$$V_{med} = 0,16692 + 0,73182 \cdot (R_1/R_2) + 4,4479 \cdot (\beta'/\beta) + 0,09785 \cdot \gamma - 9,111 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) - 0,1276 \cdot (R_1/R_2) \cdot \gamma - 0,6029 \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma + 0,90616 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma,$$

$$V_{max} = 0,29225 + 1,3098 \cdot (R_1/R_2) + 10,575 \cdot (\beta'/\beta) + 0,22003 \cdot \gamma - 19,90 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) - 0,2842 \cdot (R_1/R_2) \cdot \gamma - 1,233 \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma + 1,8095 \cdot (R_1/R_2) \cdot (\beta'/\beta) \cdot \gamma.$$

Полученные регрессионные уравнения имеют приемлемый уровень значимости, коэффициент детерминации составляет 0,78 (табл. 4). На рис. 7 показан график наблюдаемых и предсказанных значений.

На основании полученных регрессионных уравнений были построены графики функции желательности (рис. 8), соответствующие предсказанным значениям каждой зависимой переменной. На графике функции желательности отображена желательность отклика (V_{max} или V_{med}), лежащая в интервале от 0 до 1 вместе с наблюдаемыми диапазонами для каждой зависимой переменной. Данный график построен для общей желательности на каждом уровне каждого фактора (R_1/R_2 , β'/β , γ), при этом другие факторы зафиксированы в текущих уровнях. Проанализировав профили (рис. 8) совместно с контурами желательности (рис. 9), можно определить рациональное соотношение конструктивных параметров для получения желаемого значения отклика.

Желаемым значением отклика являются максимальные значения V_{max} и V_{med} , так как именно в этом случае налипание струи проявляется наиболее характерно. Функцию желательности определяли при следующих диапа-

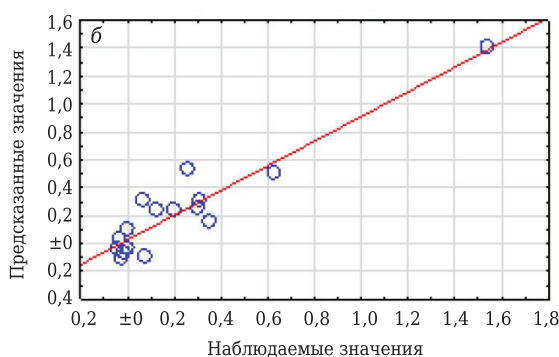


Рис. 7. Графики наблюдаемых и предсказанных значений проекции скоростей V_{max} (а) и V_{med} (б) на ось x

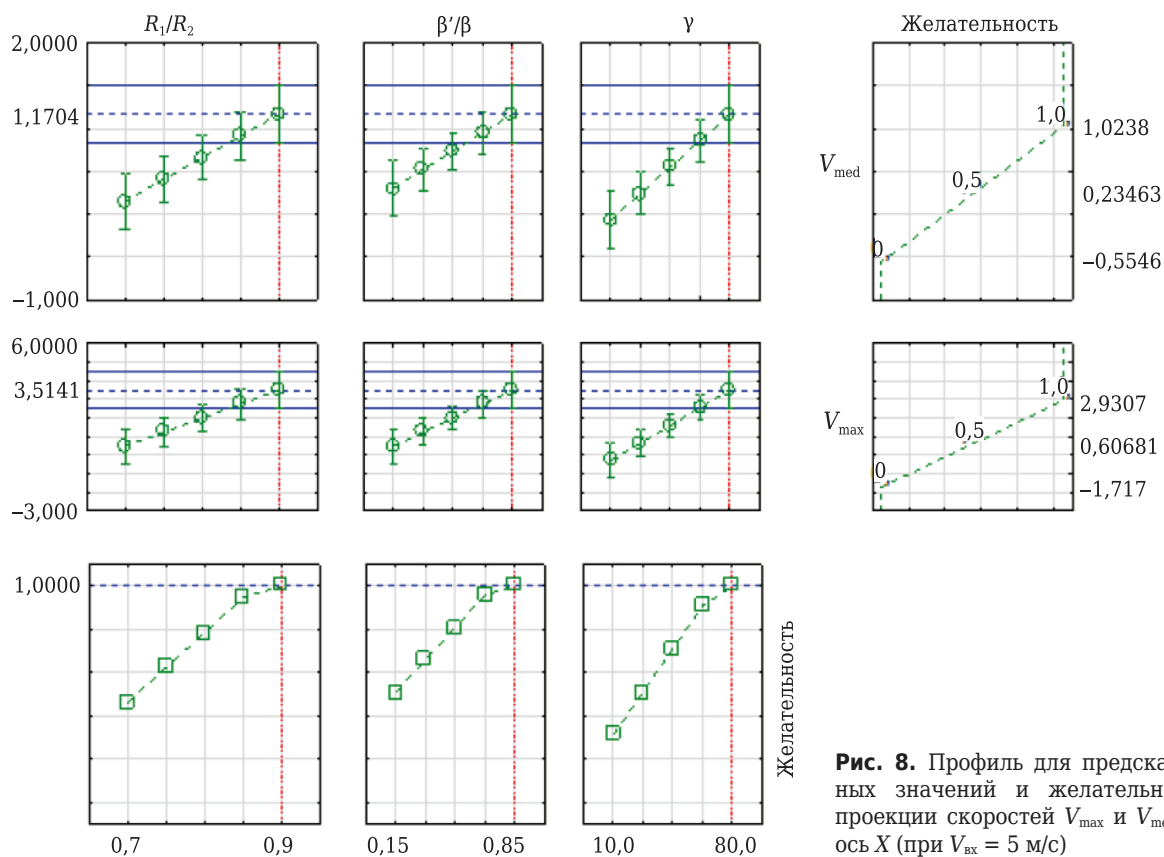


Рис. 8. Профиль для предсказанных значений и желательности проекции скоростей $V_{\max}$ и V_{med} на ось X (при $V_{\text{вх}} = 5$ м/с)

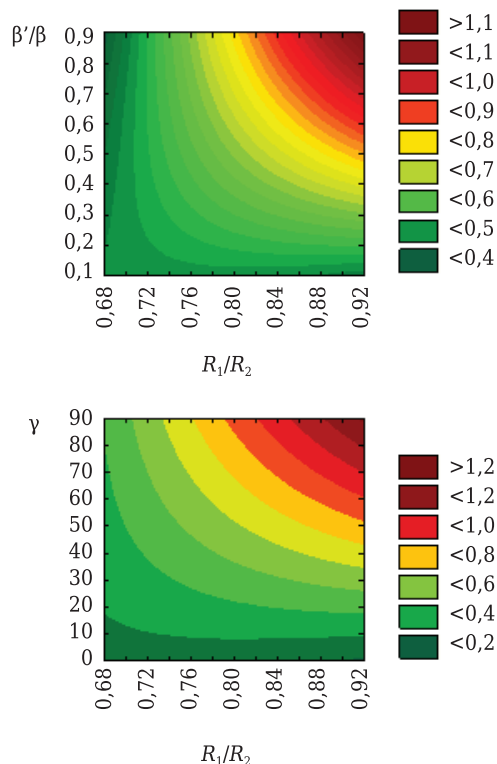


Рис. 9. Контуры желательности, полученные методом квадратичной подгонки

зонах исследуемых факторов: $R_1/R_2 = 0,7-0,9$; $\beta'/\beta = 0,15-0,85$; $\gamma = 10-80^\circ$. Данные диапазоны выбраны исходя из технологических соображений. В качестве рациональных конструктивных

параметров приняты следующие значения: $R_1/R_2 = 0,9$; $\beta'/\beta = 0,85$; $\gamma = 80^\circ$.

На налипание струи особое влияние оказывают малый размер щели между конусом и то-

ром, положение конуса, обеспечивающее наилучшее подтекание воздуха к конусу снизу, и достаточно высокий угол β' . Именно при таком сочетании проявляется эффект Коанда в исследуемом загрузочном устройстве. Когда щель становится шире, или конус слишком сильно опускается вниз или поднимается вверх, происходит разрушение налипающей струи.

Полученные уравнения можно использовать в дальнейшем для оптимизации работы предлагаемого загрузочного устройства в условиях производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из дифференциальных уравнений классической теории пограничного слоя получены аналитические выражения для определения составляющих скорости воздушного потока в осесимметричных, плоских и веерных струях при загрузке бункеров. Из сравнения построенных профилей составляющих скорости следует, что минимальной пылеобразующей способностью обладает веерная струя.

Разработана и запатентована оригинальная конструкция устройства для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих материалов, в аэродинамическую схему которого заложен эффект Коанда, формирующий веерную струю с изменением направления ее движения, что обеспечивает снижение эрозии складированного материала. Экспериментально подтверждена работоспособность конструкции устройства для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих материалов.

Разработана математическая модель воздушного течения в загрузочном узле бункера

в программном комплексе SolidWorks. Путем сравнения экспериментальных и расчетных данных установлены достоверность и адекватность расчетных полей скоростей, формируемых предложенным устройством для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих веществ. Определены эффективные режимы работы устройства для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих материалов.

Получены регрессионные уравнения, позволяющие определить геометрические характеристики устройства для снижения пылеобразования при загрузке сыпучих материалов, для создания необходимых условий, обеспечивающих инерционную сепарацию и осаждение частиц в полости бункеров.

Разработаны схемы системы вентиляции бункеров при пневмотранспортном складировании порошкообразных материалов, обеспечивающих снижение концентрации пылевых частиц в аспирационном воздухе за счет включения в аэродинамическую схему загрузочного узла эффекта Коанда. Разработаны методики расчета предлагаемых технических решений.

Проведены промышленные испытания устройства для снижения пылеобразования в условиях загрузки группы из 4 цементных силосов с учетом установки предлагаемого устройства в один из них. Запыленность воздуха перед рукавным фильтром снизилась от 8998,016 до 5886,50 мг/(Н·м³), количество пыли в аспирационном воздухе уменьшилось от 22,202 до 14,660 г/с.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10025).

Библиографический список

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Fan, C. Study on induced airflow characteristic and dust particle diffusion law at transshipment point / C. Fan, Q. Qi, X. Chen, S. Ge // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects, 2020.
5. Logachev, K. I. Simulations of dust dynamics around a cone hood in updraft conditions / K. I. Logachev, A. M. Ziganshin, O. A. Averkova // J. Occup. Environ. Hyg. — 2018. — Vol. 15. — P. 715–731.
6. Logachev, K. I. Modeling of air and dust flows in the range of action of a round suction funnel above

an impermeable plane. Part 1. A mathematical model and algorithm for its computer implementation / K. I. Logachev, O. A. Averkova, E. I. Tolmacheva [et al.] // Refract. Ind. Ceram. — 2016. — Vol. 56. — P. 679–683.

Логачев, К. И. Моделирование пылевоздушных течений в спектре действия круглого отсоса-раструба над непроницаемой плоскостью. Часть 1. Математическая модель и алгоритм ее компьютерной реализации / К. И. Логачев, О. А. Аверкова, Е. И. Толмачева [и др.] // Новые огнеупоры. — 2015. — № 12. — С. 56–60.

7. Logachev, K. I. Modeling of air and dust flows in the range of action of a round suction funnel above an impermeable plane. Part 2. Characteristics of separation region and efficiency of capture of dust particles / K. I. Logachev, O. A. Averkova, E. I. Tolmacheva [et al.] // Refract. Ind. Ceram. — 2016. — Vol. 57. — P. 103–107.

Логачев, К. И. Моделирование пылевоздушных течений в спектре действия круглого отсоса-раструба над непроницаемой плоскостью. Часть 2. Характеристики отрывной области и эффективность улавливания пылевых частиц / К. И. Логачев, О. А. Аверкова, Е. И. Толмачева [и др.] // Новые огнеупоры. — 2016. — № 2. — С. 62–66.

8. **Logachev, K.** Improving dust capture efficiency with local exhaust hoods in manicure shops / K. Logachev, A. Ziganshin, O. Kryukova [et al.] // Building and Environment. — 2020. — Vol. 181. — Article № 107124.

9. **Huang, Y.** Study on ventilation performance of lateral exhaust hood under the influence of two high-temperature buoyant jets / Y. Huang, K. Lu, J. Guo [et al.] // Building and Environment. — 2020. — Vol. 177. — Article № 106849.

10. **Huang, Y.** Study on limit flow ratio method for a lateral exhaust hood above high-temperature buoyant jets / Y. Huang, K. Lu, Y. Wang [et al.] // Sustainable Cities and Society. — 2020. — Vol. 54. — Article № 101969.

11. **Wang, Y.** Lateral ventilation performance for removal of pulsating buoyant jet under the influence of high-

temperature plume / Y. Wang, L. Cao, Y. Huang, Y. Cao // Indoor and Built Environment. — 2020. — Vol. 29, № 4.

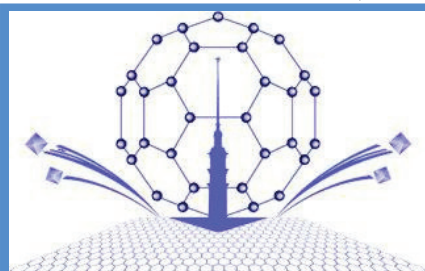
12. **Huang, Y.** Performance of constant exhaust ventilation for removal of transient high-temperature contaminated airflows and ventilation-performance comparison between two local exhaust hoods / Y. Huang, Y. Wang, L. Liu [et al.] // Energy and Buildings. — 2017. — Vol. 154. — P. 207–216.

13. **Huang, Y.** Ventilation guidelines for controlling smoke, dust, droplets and waste heat: Four representative case studies in Chinese industrial buildings / Y. Huang, Y. Wang, X. Ren [et al.] // Energy and Buildings. — 2016. — Vol. 128. — P. 834–844. ■

Получено 24.10.20

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

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



15-я международная конференция «Advanced Carbon NanoStructures 2021» (ACNS'2021)

28.06.2021–02.07.2021
Санкт-Петербург, Россия

Организаторы:

Институт Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт», Москва, Россия
Петербургский институт ядерной физики
имени Б. П. Константинова, Россия
Санкт-Петербургский государственный
технологический институт
(технический университет), Россия

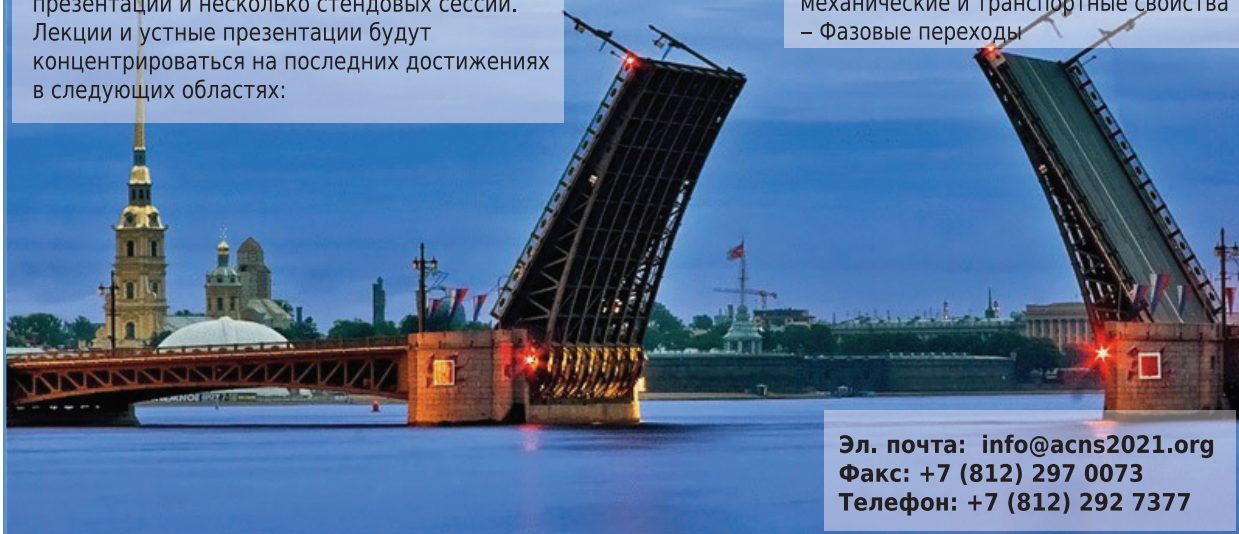
Программа традиционно будет включать лекции приглашенных спикеров, устные презентации и несколько стендовых сессий. Лекции и устные презентации будут концентрироваться на последних достижениях в следующих областях:

Материалы:

- * Фуллерены
- * Углеродные нанотрубки
- * Графен
- * Наноалмазные частицы
- * Линейные атомы углерода
- * Углерод на основе карбида
- * Композиты на основе нанокристаллов

Явления:

- Синтез
- Электронные, магнитные, оптические, механические и транспортные свойства
- Фазовые переходы



Эл. почта: info@acns2021.org
Факс: +7 (812) 297 0073
Телефон: +7 (812) 292 7377