

Д. т. н. **И. Н. Логачёв**, д. т. н. **К. И. Логачёв** (✉), к. т. н. **О. А. Аверкова**,
д. т. н. **В. Н. Азаров**, д. т. н. **В. А. Уваров**

ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет
им. В. Г. Шухова», г. Белгород, Россия

УДК 533.6:628.5

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ СИСТЕМ АСПИРАЦИИ. Часть 4. Теоретические предпосылки создания пыле локализирующих устройств с закрученными воздушными потоками*

Предложен метод снижения пылеуноса от аспирационных укрытий за счет использования закрученных потоков. С помощью разработанной программно-алгоритмической поддержки для изучения процессов пылеуноса в аспирационную сеть от локализирующих пылевыведение устройств исследована динамика пылевых аэрозолей в закрученных аспирируемых течениях.

Ключевые слова: аспирационное укрытие, перегрузка сыпучих материалов, снижение энергоемкости аспирационных систем.

ОРГАНИЗАЦИЯ В УКРЫТИИ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ

С целью снижения энергоемкости аспирационных укрытий, повышения их эффективности, а значит, и снижения пылевых выбросов в окружающую среду предлагается использовать аспирационные укрытия с закрученными воздушными потоками, схемы которых представлены на рис. 15.

От традиционно используемого укрытия на рис. 15, а отличается тем, что на входе в патрубок отсоса воздуха устанавливается лопастной ротор в виде «беличьей клетки». При протекании отсасываемого воздуха сквозь лопасти ротора он приводится во вращение и вокруг него возникает закрученное воздушное поле. Такое поле также можно создать встроенными в цилиндр-отсос по винтовой линии лопастями (рис. 15, б). Всасываемый поток поступает через продольный вырез по направляющей, прижимающей поток к внутренней поверхности цилиндра, и воздействует на поверхность внутренних выступов. При этом возникает вра-

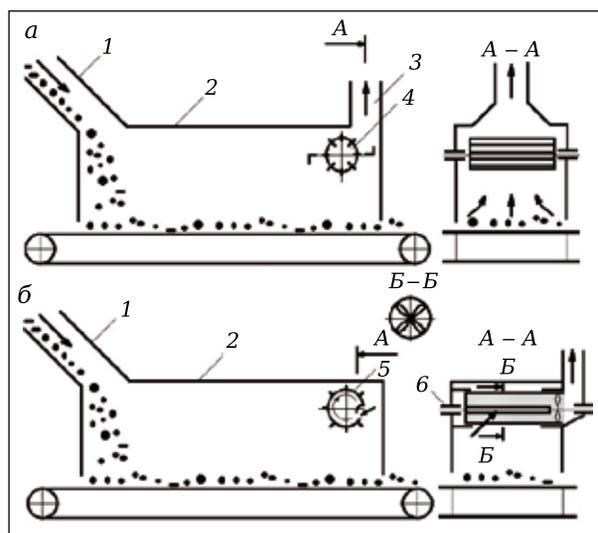


Рис. 15. Аспирационное укрытие с закрученными воздушными потоками: 1 — загрузочный желоб; 2 — корпус укрытия; 3 — патрубок отсоса воздуха; 4 — лопастной ротор; 5 — цилиндр-отсос; 6 — подшипниковый узел

щательный момент, заставляющий вращаться цилиндр, установленный в герметичных подшипниковых узлах. Таким образом возникает закрученное воздушное поле. Действие центробежных сил на пылевые частицы затрудняет их попадание в такой отсос или внутреннюю полость ротора, а закрученное аэродинамическое поле способствует их выпадению в нижнюю часть аспирационного укрытия. Отсасываемый из аспирационного укрытия воздух очищается уже на первой стадии очистки, поэтому отпадает необходимость устанавливать в аспирацион-

* Части статьи 1–3 опубликованы в журнале «Новые огнеупоры» № 2, 4 и 6 за 2014 г. В данной части статьи продолжается нумерация рисунков и формул с учетом представленных в частях 1–3.

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

ную сеть пылеулавливающие агрегаты второй и третьей степени очистки: фильтры, циклоны и др. Отметим также важный вторичный эффект, возникающий при закрутке потока. Закрученный воздушный поток, как показано в статьях [1–3], способствует взметыванию пыли, отлагающейся на стенках воздуховода. Таким образом получаемый описанным образом закрученный воздушный поток предотвращает зарастание воздухопроводов, что повышает эффективность системы аспирации.

Для проверки изложенной гипотезы необходимо разработать математические модели, вычислительные алгоритмы и программное обеспечение для расчета пылевоздушных потоков в областях произвольной геометрической формы, в которых находятся вращающиеся цилиндры или цилиндры-отсосы.

В данной работе ограничимся изложением основных расчетных соотношений и этапов численной процедуры. Более подробное изложение вычислительных алгоритмов, возможностей компьютерных программ приведено в монографиях [4, 5].

ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЫЛЕВОЗДУШНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ОБЛАСТЯХ С ВРАЩАЮЩИМИСЯ РОТОРАМИ И ЦИЛИНДРАМИ-ОТСОСАМИ

Рассмотрим область с границей S , на которой задана нормальная составляющая скорости (рис. 16).

В области могут находиться роторы и цилиндры-отсосы с известными линейными скоростями вращения $v_k, k = 1, 2, \dots, M$. Для моделирования границы S используем простой слой: непрерывно распределенные фиктивные источники с интенсивностями $q(\xi, t)$. Для учета влияния воздушного потока, инициируемого вращением цилиндров радиусами R_k , разместим в их центрах c_k плоские вихри с известными величинами циркуляций $\Gamma_k = 2\pi R_k v_k$. Проекция скорости на данное направление \vec{n} внутри области в заданной точке x определяется из выражения

$$v_n(x, t) = \int_S F_2(x, \xi^k, t) q(\xi^k, t) dS(\xi^k) + 2\pi \sum_{k=1}^M R_k v_k G(x, c_k). \quad (37)$$

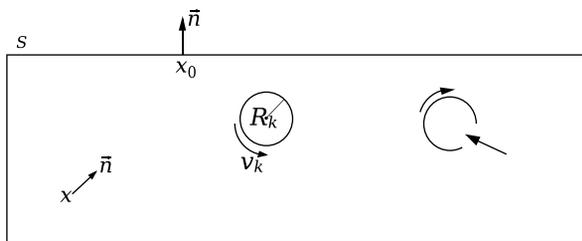


Рис. 16. Область с вращающимися роторами и цилиндром-отсосом

Для определения неизвестного распределения источников по границе уравнение (37) сводим к граничному интегральному уравнению

$$v_n(x_0, t) = -0,5q(x_0, t) + \int_S F_2(x_0^p, \xi^k, t) q(\xi^k, t) dS(\xi^k) + 2\pi \sum_{k=1}^M R_k v_k G(x_0^p, c_k), \quad (38)$$

где

$$F_2(x, \xi) = \frac{1}{2\pi} \frac{(x_1 - \xi_1)n_1 + (x_2 - \xi_2)n_2}{(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2}, \quad (38a)$$

$$G(x, \xi) = \frac{(x_1 - \xi_1)n_2 - (x_2 - \xi_2)n_1}{2\pi((x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2)}. \quad (38b)$$

Функция $F_2(x, \xi)$ — это функция влияния на точку $x(x_1, x_2)$ единичного источника, расположенного в точке $\xi(\xi_1, \xi_2)$ вдоль единичного вектора $\vec{n} = \{n_1, n_2\}$. Функция $G(x, \xi)$ выражает такое же влияние, но только единичного вихря.

Дискретный аналог граничного интегрального уравнения (38) имеет следующий вид:

$$-0,5q(x_0^p, t) + \sum_{\substack{k=1, \\ k \neq p}}^N q(\xi^k, t) \int_{\Delta S^k} F_2(x_0^p, \xi^k, t) dS(\xi^k) = v_n(x_0^p, t) - 2\pi \sum_{k=1}^M R_k v_k G(x_0^p, c_k), \quad (39)$$

где N — количество отрезков границы; x_0^p — центр p -го отрезка.

Решая при $p = \overline{1, N}$ систему линейных уравнений (39) и определив неизвестное распределение $q(\xi, t)$, получаем искомое поле в момент времени t :

$$v_n(x, t) = \sum_{k=1}^N q(\xi^k, t) \int_{\Delta S^k} F_2(x, \xi^k, t) dS(\xi^k) + 2\pi \sum_{k=1}^M R_k v_k G(x, c_k). \quad (40)$$

Траектория пылевой частицы строится на основании интегрирования уравнения ее движения [4]:

$$\frac{1}{6} \rho_p \pi d_e^3 \dot{v}_p(t) = -\psi |\vec{v}_p - \vec{v}_a| (\vec{v}_p - \vec{v}_a) \rho_a \chi S_m / 2 + \frac{1}{6} \rho_p \pi d_e^3 \dot{g}, \quad (41)$$

где \vec{v}_a — скорость воздуха; ρ_a — плотность воздуха; \vec{v}_p — скорость частицы; ρ_p — плотность частицы; d_e — эквивалентный диаметр частицы; \dot{g} — ускорение свободного падения; S_m — площадь миделевого сечения частицы, $S_m = \pi d_e^2 / 4$; χ — коэффициент ее динамической формы; ψ — коэффициент сопротивления воздуха, вычисляемый по формулам Стокса, Клячко, Адамова:

$$\psi = \begin{cases} \frac{24}{Re}, & \text{если } Re < 1, \\ \frac{24(1 + \sqrt[3]{Re^2/6})}{Re}, & \text{если } 1 \leq Re \leq 1000, \\ \frac{24\sqrt{(1 + 0,065\sqrt[3]{Re^2/6})^3}}{Re}, & \text{если } Re > 1000, \end{cases} \quad (42)$$

где $Re = \frac{\rho_a |v_p - v_a| d_e}{\mu}$, μ — коэффициент динамической вязкости воздуха.

Пылевая частица при столкновении с твердой поверхностью приобретает тангенциальную $v_{2\tau}$ и нормальную v_{2n} составляющие скорости, вычисляемые по формуле Н. Д. Воробьева [6, с. 168–173]:

$$v_{2n} = -kv_{1n}, \quad v_{2\tau} = v_{1\tau} + \eta f(1 + k)v_{1n}, \quad (43)$$

где k — коэффициент восстановления при ударе; f — коэффициент трения скольжения; $\eta = -\frac{2v_{1\tau}}{7f(1+k)v_{1n}}$, если $\frac{2v_{1\tau}}{7f(1+k)v_{1n}} < 1$ и $\eta = 1$ в обратном случае.

Уравнение динамики пылевой частицы (41) решалось численно методом Рунге – Кутта в найденном поле скоростей воздуха.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОДИНОЧНЫХ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В АСПИРАЦИОННЫХ УКРЫТИЯХ

Приведем только результаты вычислительного эксперимента, показывающего наибольшее уменьшение величины максимального диаметра относительно необорудованного стандартного аспирационного укрытия. Для вычислительного эксперимента выбрано аспирационное укрытие (рис. 17), используемое для локализации пылевыделений узла загрузки конвейера [5].

Вычислительные эксперименты показывают, что с увеличением коэффициента динамической формы пылевой частицы и уменьшением ее плотности величина максимального диаметра значительно увеличивается (рис. 18) и достигает 300 мкм.

При размещении вращающегося цилиндра-отсоса в правом верхнем углу (рис. 19) аспирационного укрытия и ротора в нижней части механического экрана величина максимального диаметра существенно снижается. Напри-

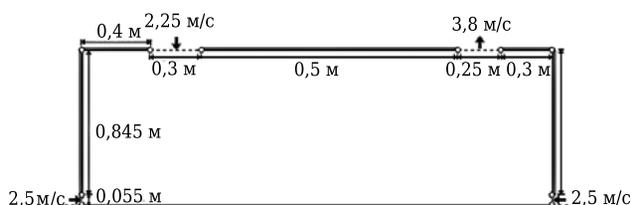


Рис. 17. Укрытие с одинарными стенками

мер, относительно показателей в предыдущем разделе снижение наблюдается на 60 мкм для сферических частиц плотностью 3200 кг/м³ и на 150 мкм для пластинчатых частиц при коэффициенте формы 6,5 и той же плотности.

Отметим волнообразный характер траекторий пылевых частиц, улавливаемых цилиндром-отсосом, что обусловлено пульсирующим полем скоростей в аспирационном укрытии: скорость в заданной точке изменяется периодически с периодом, равным времени полного оборота цилиндра-отсоса.

ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ДИНАМИКИ ПОЛИФРАКЦИОННЫХ ПЫЛЕВЫХ АЭРОЗОЛЕЙ В АСПИРАЦИОННЫХ УКРЫТИЯХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В предыдущем разделе не учитывалось влияние вихревых областей, возникающих в аспирационном укрытии при срыве потока, поэтому была разработана математическая модель

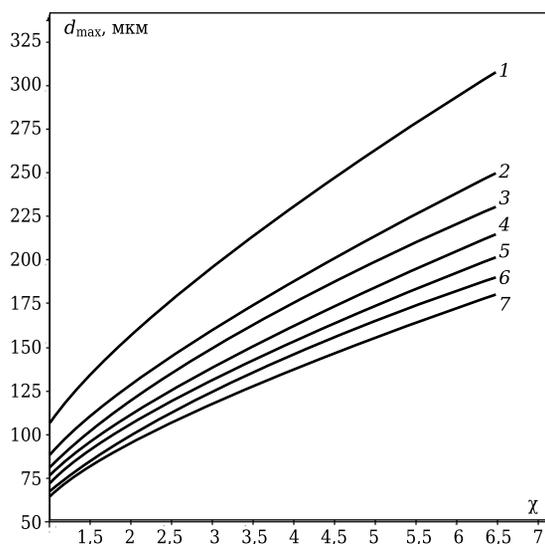


Рис. 18. Зависимость величины максимального диаметра d_{max} пылевой частицы от коэффициента ее формы χ и плотности, кг/м³: 1 — 1400; 2 — 2000; 3 — 2300; 4 — 2600; 5 — 2900; 6 — 3200; 7 — 3500

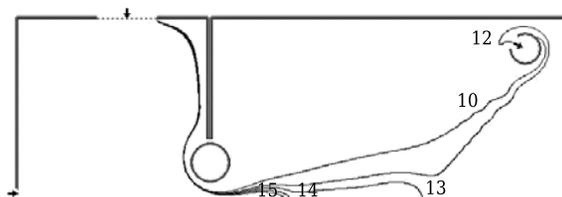


Рис. 19. Траектории пылевых частиц при скорости вращения против часовой стрелки ротора 8 и цилиндра-отсоса 4 м/с. Указаны эквивалентные диаметры пылевых частиц, мкм

вихревых нестационарных течений в областях с вращающимися цилиндрами.

При аналогичной постановке задачи, описанной в разделе «Основные расчетные соотношения для моделирования пылевоздушных течений в областях с вращающимися роторами и цилиндрами-отсосами», границу области, включая контуры цилиндров, дискретизируем контрольными точками и присоединенными вихрями. В контрольных точках задана нормальная составляющая скорости. Шаг дискретности одинаков и равен h . В изломах границы располагались присоединенные вихри. Контур цилиндры моделируются простым слоем. В начальный момент времени $t = +0$ начинают действовать все активные отверстия.

Свободные вихри срываются с острых кромок в каждый расчетный момент времени. Их циркуляции не изменялись с течением времени и были равны циркуляциям вихрей, расположенных в соответствующих точках срыва потока. Свободные вихри двигались по траекториям жидких частиц.

После определения неизвестных величин циркуляций присоединенных вихрей и распределения источников по контурам цилиндров путем решения системы уравнений

$$\begin{cases} -0,5q(x^p) + \sum_{k=N+1}^{N+W} q(\xi^k) \int_{\Delta S^k} F_2(x^p, \xi^k) dS(\xi^k) + \sum_{k=N+1}^{N+W} G(x^p, \xi^k) \Gamma(\xi^k) + \Lambda = \\ = v_n(x^p) - 2\pi \sum_{k=1}^M R_k v_k G(x^p, C_k) - \sum_{\tau=1}^m \sum_{l=1}^L G(x^p, \zeta^{l\tau}) \gamma^{l\tau}, \\ \sum_{k=1}^N \Gamma(\xi^k) + \sum_{\tau=1}^m \sum_{l=1}^L \gamma^{l\tau} = 0 \end{cases}$$

поле скоростей в момент времени $t = m \cdot \Delta t$ определялось из выражения

$$v_n(x) = \sum_{k=N+1}^{N+W} q(\xi^k) \int_{\Delta S^k} F_2(x, \xi^k) dS(\xi^k) + \sum_{k=1}^N G(x, \xi^k) \Gamma(\xi^k) + 2\pi \sum_{k=1}^M R_k v_k G(x, C_k) + \sum_{\tau=1}^m \sum_{l=1}^L G(x^p, \zeta^{l\tau}) \gamma^{l\tau},$$

где $\Gamma(\xi^k)$ — циркуляции присоединенных вихрей; N — количество циркуляций; $q(\xi^k)$, $k = N + 1, N + 2, \dots, N + W$ — интенсивности источников; $v_n(x^p)$ — нормальная составляющая скорости в p -й контрольной точке при $p = 1, 2, \dots, N$ или в центре p -го отрезка при $p = N + 1, N + 2, \dots, N + W$. Функции F_2 и G вычисляются по формулам (38а) и (38б) соответственно.

В найденном поле скоростей моделировали движение полифракционной совокупности пылевых частиц при помощи численного решения уравнений (41)–(43). Из приточного отверстия поступали частицы разных размеров. Задавалась концентрация пыли и осуществлялось моделирование частиц до осаждения или улавливания. Определяли суммарную массу частиц, попавших в отсос, и концентрацию, равную отношению этой массы к объему воздуха, в котором они содержались. Дисперсный состав опреде-

ляется счетным путем частиц разных фракций, уловленных отсосом. С помощью разработанной программы [7] исследуем динамику пылевого облака в аспирационном укрытии с учетом вихревого нестационарного течения воздуха.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЫЛЕВОГО ПОЛИДИСПЕРСНОГО ОБЛАКА В АСПИРАЦИОННОМ УКРЫТИИ УЗЛА ПЕРЕГРУЗКИ КЛИНКЕРА НА КОНВЕЙЕР

Динамику полифракционного пылевого облака, состоящего из 30 тыс. пылевых частиц, исходный дисперсный состав которого указан в табл. 5, исследовали вначале в стандартном аспирационном укрытии (рис. 20).

Как видно на рис. 21, пылевые частицы обигают область центрального вихря. Очевидно, что от количества пылевых частиц, запускаемых из

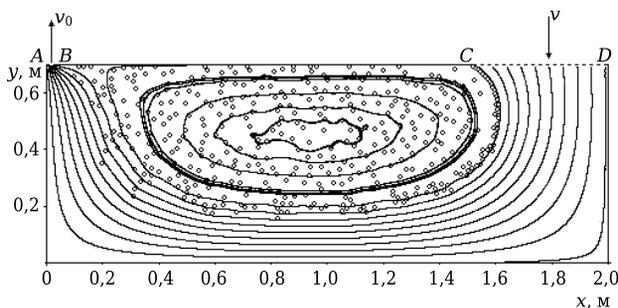


Рис. 20. Линии тока и вихревая структура течения в аспирационном укрытии: AB — ширина вытяжного отверстия; CD — ширина приточного отверстия

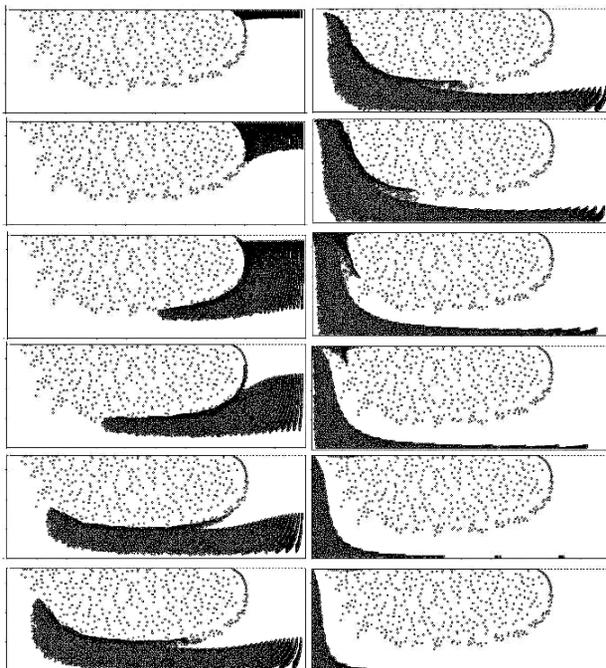


Рис. 21. Динамика пылевого полифракционного облака из 30 тыс. пылевых частиц (сверху вниз с течением времени)

Таблица 5. Изменение дисперсного состава, доли, пылевого облака и концентрации пыли в зависимости от количества частиц в нем

Размер частиц, мкм			
5-6	6-10	10-20	20-40
Дисперсный состав пыли в приточном отверстии			
0,1	0,3	0,25	0,35
Дисперсный состав пыли в вытяжном отверстии*			
	$N = 60, C_{п}/C_{в} = 1,492$		
0,097	0,194	0,290	0,419
	$N = 300, C_{п}/C_{в} = 1,552$		
0,081	0,256	0,219	0,444
	$N = 3000, C_{п}/C_{в} = 1,591$		
0,082	0,278	0,225	0,415
	$N = 30000, C_{п}/C_{в} = 1,572$		
0,082	0,259	0,230	0,428
	$N = 60000, C_{п}/C_{в} = 1,575$		
0,083	0,260	0,233	0,424

* N — число пылевых частиц, $C_{п}/C_{в}$ — отношение концентраций в приточном и вытяжном отверстиях.

приточного отверстия в аспирационное укрытие, могут зависеть искомые параметры аэрозольного потока (дисперсный состав и концентрация). Поэтому были проведены методические исследования влияния количества пылинок на искомые параметры.

Исходные данные для расчета: концентрация пылевых частиц 4 мг/м^3 , плотность частицы $\rho = 3050 \text{ кг/м}^3$; коэффициент динамической формы частицы $\chi = 1,8$; скорость воздуха в приточном отверстии $v = 1 \text{ м/с}$, в вытяжном отверстии — $v_0 = 15,3 \text{ м/с}$; ширина приточного отверстия $AB = 0,0314 \text{ м}$; вытяжного $CD = 0,48 \text{ м}$. Шаг по времени для расчета движения пылевых частиц $0,0002961 \text{ с}$, количество свободных вихрей 424. В каждый момент времени в область укрытия поступает 30 пылевых частиц разных размеров.

Как видно из табл. 5, с увеличением количества пылинок дисперсный состав и отношение концентраций в приточном и вытяжном воздухе стабилизируется. Вполне достаточно исследовать полет 3000 пылевых частиц.

Замена вытяжного отверстия на вращающийся цилиндр-отсос существенно изменяет аэродинамику внутри укрытия (рис. 22). Концентрацию пыли в отсасываемом воздухе можно

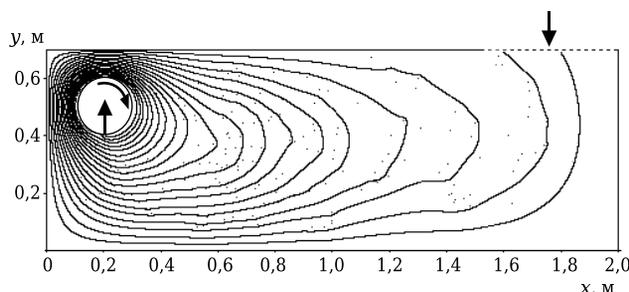


Рис. 22. Закрученное воздушное поле

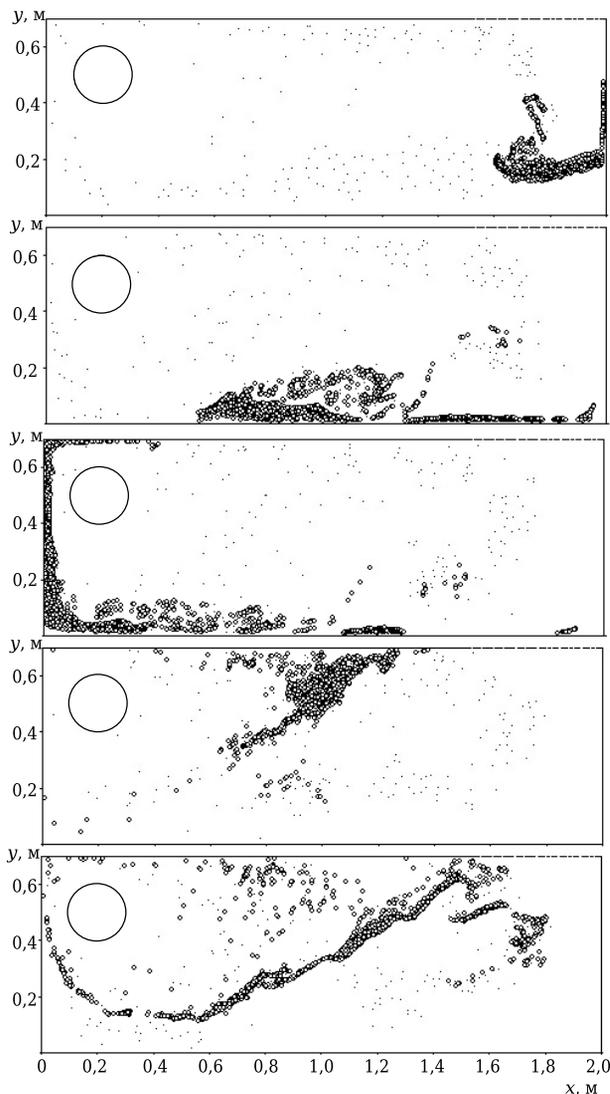


Рис. 23. Осаждение пыли в аспирационном укрытии с вращающимся цилиндром-отсосом (сверху вниз с течением времени)

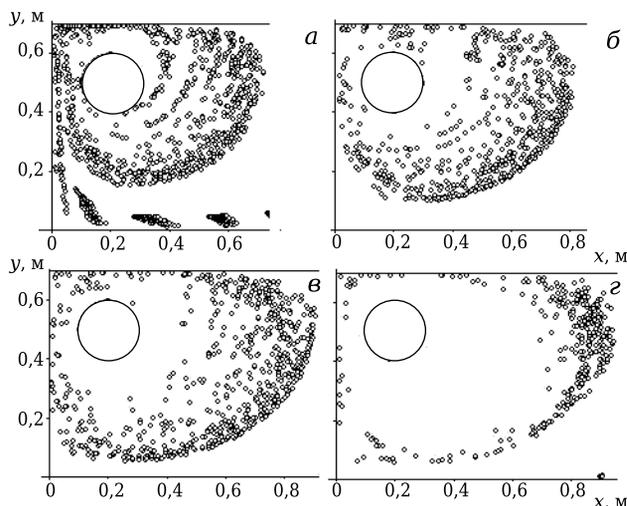


Рис. 24. Вращение потока частиц при разной скорости вращения цилиндра-отсоса, м/с: а — 20; б — 30; в — 40; г — 60

значительно снизить. Все зависит от скорости вращения цилиндра-отсоса. Очевидно, что он должен быть наиболее удален от загрузочного желоба и конвейерной ленты. Направление вращения должно способствовать осаждению пыли.

Динамика пылевого облака для этого случая показана на рис. 23. Параметры расчета такие же, как и для укрытия стандартной конструкции. Рассматривался полет пылевого облака, состоящего из 3000 пылинок. Цилиндр с отсосом шириной 2,5 и радиусом 10 см вращался по часовой стрелке. Заметим, что наличие центрального вихря способствует осаждению пылевых частиц. При линейной скорости вращения цилиндра 20 м/с концентрация во всасывающем

канале уменьшается в 40 раз, фракция частиц 20–40 мкм полностью осаждаются. При увеличении скорости вращения до 30 м/с таких фракций будет уже две: 10–20 и 20–40 мкм. Область вращения частиц увеличивается с ростом скорости вращения отсоса (рис. 24). При скорости вращения 60 м/с пыль оседает полностью.

* * *

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (проект МК-103.2014.1) и программы стратегического развития БГТУ им. В. Г. Шухова (проект № А-10/12) и РФФИ (проект № 14-41-08005р_офи_м).

Библиографический список

1. **Азаров, В. Н.** Повышение устойчивости работы системы аспирации с использованием закрутки потока / В. Н. Азаров, Д. П. Боровков // Строительство и реконструкция. — 2012. — № 2. — С. 69–73.
 2. **Азаров, В. Н.** О транспортировании пылевых частиц закрученными потоками в воздуховодах систем аспирации и обеспыливающей вентиляции / В. Н. Азаров, Д. П. Боровков, С. В. Филиппова // Известия Юго-Западного государственного университета. — 2012. — № 3–1. — С. 113–119.
 3. **Азаров, В. Н.** К методике аэродинамического расчета систем аспирации с закруткой потока в воздуховодах вентиляции / В. Н. Азаров, Д. П. Боровков, С. В. Филиппова // Интернет-Вестник ВолгГАСУ. — 2012. — № 1 (20). — С. 18–23.
 4. **Логачёв, И. Н.** Аэродинамические основы аспирации вентиляции / И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв // СПб. : Химиздат, 2005. — 659 с.
 5. **Логачёв, И. Н.** Энергосбережение в аспирации: теоретические предпосылки и рекомендации / И. Н. Ло-

гачёв, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова. — М. – Ижевск : РХД, 2013. — 504 с.
 6. **Воробьёв, Н. Д.** Моделирование взаимодействия мелющего тела с футеровкой трубной мельницы / Н. Д. Воробьёв, В. С. Богданов, М. Ю. Ельцов // Физико-математические методы в строительном материаловедении. — М. : МИСИ ; Белгород : БТИСМ, 1986.
 7. **Анжеуров, Н. М.** Комплекс компьютерных программ для расчета пылевоздушных течений в системах аспирации / Н. М. Анжеуров, О. А. Аверкова // Новые огнеупоры. — 2008. — № 5. — С. 53–58.
Anzheurov, N. M. Software for computing dusty air flows in ventilation systems / N. M. Anzheurov, O. A. Averkova // Refractories and Industrial Ceramics. — 2008. — Vol. 49, № 3. — P. 229–234. ■

Получено 14.01.14

© И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова, В. Н. Азаров, В. А. Уваров, 2014 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

COM 2014
CONFERENCE OF METALLURGISTS
MET * SOC

PROSPERITY THROUGH PROCESS ADVANCEMENTS

SEPTEMBER 28 TO OCTOBER 1, 2014 • HYATT REGENCY HOTEL, VANCOUVER (BC)

COM 2014 — конгресс сталеплавильщиков

28 сентября – 1 октября
2014 г.

г. Ванкувер,
Канада