

УДК 533.6.011

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЫЛЕГАЗОВЫХ ПОТОКОВ ВБЛИЗИ ВСАСЫВАЮЩЕГО ОТВЕРСТИЯ В МНОГОСВЯЗНОЙ ОБЛАСТИ С ВРАЩАЮЩИМСЯ ЦИЛИНДРОМ

О. А. Аверкова<sup>1</sup>

Обсуждается математическая модель динамики пылегазовых потоков вблизи всасывающих отверстий, в области действия которых находится непроницаемый вращающийся цилиндр. Выполнен расчет вентиляционных местных отсосов от вальцетокарного станка. Показано, что пренебрежение воздушным потоком, индуцированным вращающимся цилиндром, приводит к значительным погрешностям. Для определения необходимого объема аспирации одним из основных показателей является отношение скорости всасывания к линейной скорости вращения цилиндра. Работа выполнена при поддержке РФФИ (код проекта 05-08-01252а).

**Ключевые слова:** аспирация, вентиляционный местный отсос, метод граничных интегральных уравнений, численное моделирование

**1. Введение.** При расчете открытых вентиляционных местных отсосов (ВМО) от различного вида токарных станков зачастую пренебрегают действием воздушного потока, индуцированного вращающейся цилиндрической деталью [1].

В работе [2] показано, что воздушный поток, движение которого инициирует этот вращающийся цилиндр, потенциален. Путем наложения этого потока на поток воздуха, всасываемого ВМО, в работе [3] получено искомое поле скоростей и изучено в нем движение пылевых частиц. Однако при этом не учитывалось влияние как самого цилиндра, так и других элементов технологического оборудования; кроме того, нарушалось условие непроницаемости на твердой границе течения. Использование метода граничных интегральных уравнений позволило устранить эту трудность в работе [4], где исследуется пылединамика вблизи встроенного в плоскую безграничную стенку щелевого отсоса, в области действия которого находится вращающийся цилиндр, но без учета других элементов технологического оборудования, и изучается полет пылевых частиц лишь при условии стоковского обтекания их воздухом. Отметим также работу [5], где рассматривается поведение пылевой аэрозоли внутри аспирационного укрытия, оборудованного вращающимся цилиндром-отсосом.

Целью настоящей статьи является изучение пылегазовых потоков вблизи ВМО с учетом элементов технологического оборудования и определение влияния воздушного потока, инициированного вращением цилиндра, на улавливаемую аспирационным патрубком пылевую аэрозоль.

**2. Постановка задачи. Алгоритмы расчета.** Пусть область двумерного потенциального течения пылегазовой смеси ограничена кривой  $S$  (рис. 1), на которой задана нормальная составляющая скорости воздуха  $v_n(x)$ . Внутри области находится вращающийся с линейной скоростью  $v_{\text{вр}}$  цилиндр радиуса  $R$ . В центр цилиндра поместим линейный вихрь с циркуляцией  $\Gamma = -2\pi R v_{\text{вр}}$ , что дает возможность учесть влияние инициируемого им потока. Необходимо определить скорость воздуха в рассматриваемой области в любом заданном направлении. Для этого непрерывным образом разместим по границе области источники (стоки) неизвестных заранее интенсивностей  $q(\xi)$ ,  $\xi \in S$ , которые определяются из заданных граничных значений нормальной составляющей скорости (непроницаемость на твердых стенках границы и скорость  $v_0$  во всасывающем отверстии) и из наличия линейного вихря.

Суммируя действие на внутреннюю точку  $x$  вдоль направления  $\mathbf{n} = (n_1, n_2)$  всех этих источников (стоков) и вихря, получим следующее интегральное уравнение:

$$v_n(x) = \int_S q(\xi)F(x, \xi) dS(\xi) + \Gamma(a)G(x, a). \tag{1}$$

Здесь  $F(x, \xi) = \frac{n_1(x_1 - \xi_1) + n_2(x_2 - \xi_2)}{2\pi[(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2]}$ ,  $G(x, a) = \frac{n_2(x_1 - a_1) - n_1(x_2 - a_2)}{2\pi[(x_1 - a_1)^2 + (x_2 - a_2)^2]}$ , где  $(x_1, x_2)$ ,  $(\xi_1, \xi_2)$  и

<sup>1</sup> Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, Институт экономики и менеджмента, ул. Костюкова, 46, 308012, г. Белгород; e-mail: olga\_19572004@mail.ru

$(a_1, a_2)$  — координаты внутренней точки  $x$ , граничной точки  $\xi$  и точки  $a$  расположения вихря соответственно.

Разобьем границу  $S$  на  $N$  прямолинейных отрезков. Полагая, что интенсивность источников и стоков на каждом из отрезков постоянна, получим дискретный аналог уравнения (1):

$$v_n(x) = \sum_{k=1}^N \int_{\Delta S^k} q(\xi^k) F(x, \xi^k) dS + \Gamma(a)G(x, a), \quad (2)$$

где интегралы берутся по отрезкам  $\Delta S^k$  и  $\xi^k$  — произвольная точка  $k$ -го отрезка.

При устремлении внутренней точки  $x$  к граничной точке  $x_0$  уравнение (2) принимает вид

$$v_n(x_0) = -\frac{1}{2}q(x_0) + \sum_{k=1}^N q(\xi^k) \int_{\Delta S^k} F(x_0, \xi^k) dS + \Gamma(a)G(x_0, a). \quad (3)$$

Здесь первое слагаемое получено в результате вычисления интеграла по отрезку, содержащему точку  $x_0 = \xi^k$ . Поэтому под знаком суммы в (3) отсутствует слагаемое, соответствующее этому случаю. Если в качестве точки  $x_0$  использовать центр  $p$ -го отрезка  $x_0^p$ , то, перебирая все  $N$  граничных отрезков при  $p = 1, 2, \dots, N$ , получим систему  $N$  линейных алгебраических уравнений с  $N$  неизвестными:

$$-\frac{1}{2}q(x_0^p) + \sum_{\substack{k=1, \\ k \neq p}}^N q(\xi^k) \int_{\Delta S^k} F(x_0^p, \xi^k) dS = v_n(x_0^p) - \Gamma(a)G(x_0^p, a). \quad (4)$$

Система линейных уравнений (4) решается нами методом Гаусса с выбором ведущего элемента по строке. Определив неизвестные  $q(\xi^1), q(\xi^2), \dots, q(\xi^N)$ , можно вычислить искомую скорость воздуха в точке  $x$  вдоль данного направления  $\mathbf{n}$  по формуле (2).

Для построения линии тока используется следующий алгоритм: задается начальная точка; вычисляется в ней горизонтальная  $v_x$  и вертикальная  $v_y$  составляющие скорости воздуха и, тем самым, определяется направление течения  $\mathbf{v}$ ; выполняется шаг в данном направлении; вновь определяются составляющие скорости в найденной точке, снова делается шаг и т.д. Возможен и обратный ход расчета, когда линия тока строится от всасывающего отверстия, т.е. выполняется шаг в направлении, противоположном вектору  $\mathbf{v}$ . Расчет прекращается, когда либо достигается линия отсоса воздуха, либо длина линии тока превышает заданную величину.

Метод Рунге–Кутты четвертого порядка точности используется для построения траектории пылевой частицы из уравнения ее движения:

$$\rho_1 \frac{\pi d_e^3}{6} \frac{d\mathbf{v}_1}{dt} = -\psi \frac{|\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}|(\mathbf{v}_1 - \mathbf{v})}{2} \rho \chi S_m + \rho_1 \frac{\pi d_e^3}{6} \mathbf{g},$$

где  $\rho_1, \rho$  — плотности пылевой частицы и среды соответственно,  $\mathbf{v}_1$  — вектор скорости частицы,  $\mathbf{v}$  — скорость воздуха,  $d_e$  — эквивалентный диаметр,  $S_m = \pi d_e^2/4$  — площадь миделевого сечения,  $\chi$  — коэффициент динамической формы частицы,  $\mathbf{g}$  — ускорение свободного падения и  $\psi$  — коэффициент сопротивления среды:

$$\psi = \begin{cases} 24/\text{Re} & \text{при } \text{Re} < 1 \quad (\text{формула Стокса}), \\ 24(1 + 1/6 \text{Re}^{2/3})/\text{Re} & \text{при } 1 \leq \text{Re} < 10^3 \quad (\text{формула Клячко}), \\ 24(1 + 0,065 \text{Re}^{2/3})^{1,5}/\text{Re} & \text{при } \text{Re} \geq 10^3 \quad (\text{формула Адамова}). \end{cases}$$

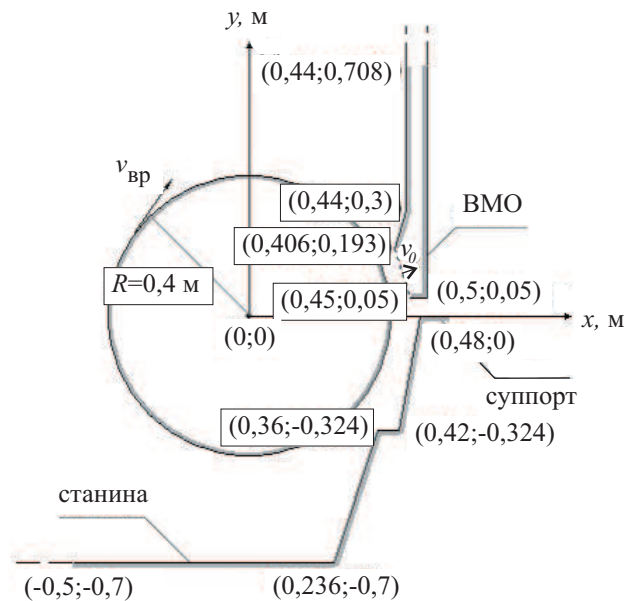


Рис. 1. Схема течения вблизи местного отсоса от вальцетокарного станка

Здесь  $Re = \frac{\rho|v_1 - v|d_e}{\mu}$ , где  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости среды.

При столкновении частицы с твердой стенкой тангенциальная  $v_{2\tau}$  и нормальная  $v_{2n}$  скорости вычисляются (см. [6]) по формулам  $v_{2\tau} = v_{0\tau} + \eta f(1+k)v_{0n}$  и  $v_{2n} = -kv_{0n}$ , где  $\eta = \min\left\{-\frac{2v_{0\tau}}{7f(1+k)v_{0n}}, 1\right\}$ ,  $k$  — коэффициент восстановления при ударе и  $f$  — коэффициент трения скольжения.

**3. Результаты расчетов и их обсуждение.** Первая расчетная схема течения изображена на рис. 1. Границы области течения задаются в соответствии со схемой аспирации от вальцетокарного станка.

Линии тока строились от всасывающего отверстия. Шаг построения линий тока — 0,001 м, интервал между ними — 0,005 м. Количество граничных отрезков около 760. При покоящемся цилиндре всасываемый поток состоит из трех частей (рис. 2): I — над цилиндром; II — между цилиндром и станиной; III — между ВМО и суппортом. Расход воздуха в этих потоках относится примерно как 14:5:11 соответственно.

При вращении цилиндра по часовой стрелке с линейной скоростью 0,5 м/с (эти параметры соответствуют процессу обработке валка на станке) и при скорости всасывания 0,5 м/с картина течения существенно меняется. Практически весь объем аспирации состоит из потока III, который проходит между ВМО и суппортом, циркулирует по часовой стрелке вокруг цилиндра и поступает во всасывающее отверстие (рис. 3).

При увеличении скорости во всасывающем отверстии (рис. 4–6) всасываемый поток вновь разделяется на три части. Область циркуляционного течения вокруг цилиндра уменьшается с увеличением скорости всасывания. Очевидно, что при значительном увеличении скорости всасывания картина течения будет аналогична рис. 2.

Построение траекторий пылевых частиц выполнялись при следующих значениях параметров расчета: шаг интегрирования  $h = 0,001$  м; коэффициент динамической формы  $\chi = 1,8$ ; плотность воздуха  $\rho = 1,205$  кг/м<sup>3</sup>; динамическая вязкость воздуха  $\mu = 0,0000178$  Па·с; коэффициент восстановления при ударе  $k = 0,5$ ; коэффициент трения скольжения  $f = 0,5$ . Точка вылета пылевых частиц имела координаты  $x_0 = 0,41$  м и  $y_0 = 0$  (примерное положение образования пылевыделений при обработке резцом цилиндра — валка). Начальная скорость пылевых частиц полагалась нулевой. При  $v_0/v_{vr} = 2$  (рис. 7) вследствие большего влияния циркуляционного течения вокруг цилиндра наблюдается облет пылевых частиц размером менее 50 мкм вокруг цилиндра с последующим их улавливанием. Более крупные частицы осаждаются на станину станка.

При  $v_0/v_{vr} = 4$  (рис. 8) облет пылевых частиц вокруг цилиндра не наблюдается, так как сказывается большее влияние потока, инициируемого ВМО. Заметим, что вращение цилиндра оказывает значительное влияние на величину максимального диаметра  $d_{max}$  пылевых частиц, улавливаемых ВМО (табл. 1). В случае покоящегося цилиндра ( $v_{vr} = 0$  м/с) максимальный диаметр пылевых частиц превышает в 3–4 раза диаметр частиц при вращении цилиндра.

Рассмотрим схему аспирации вальцетокарного станка без подсоса воздуха между ВМО и суппортом

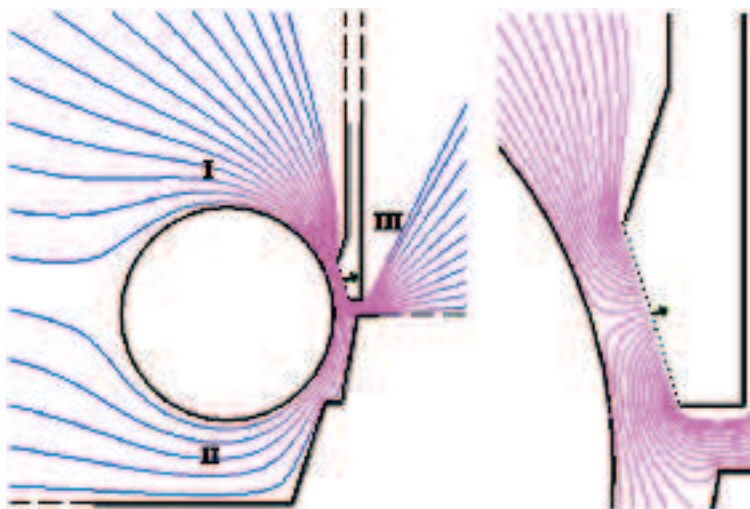


Рис. 2. Линии тока при покоящемся цилиндре и скорости  $v_0 = 2$  м/с



Рис. 3. Линии тока при вращении цилиндра с линейной скоростью  $v_{vr} = 0,5$  м/с и  $v_0 = 0,5$  м/с

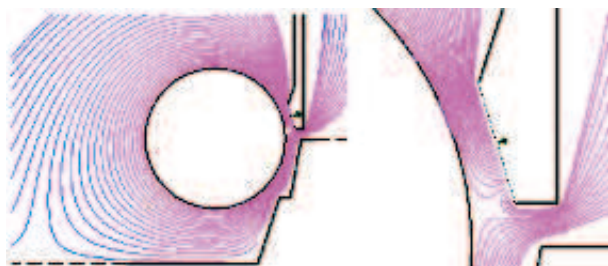


Рис. 4. Линии тока при вращении цилиндра с линейной скоростью  $v_{vr} = 0,5$  м/с и  $v_0 = 1$  м/с

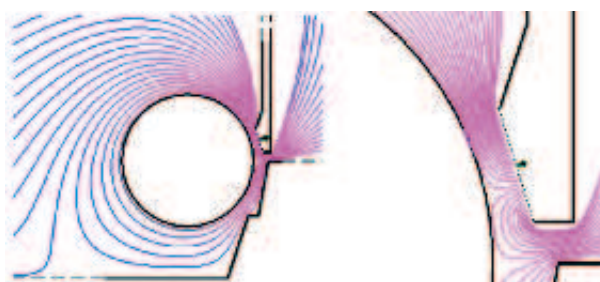


Рис. 5. Линии тока при вращении цилиндра с линейной скоростью  $v_{vr} = 0,5$  м/с и  $v_0 = 2$  м/с

(рис. 9), что соответствует случаю установки механического “экрана”, перекрывающего приток воздуха из области III. В этом случае расход отсасываемого воздуха складывается из двух потоков: над и под цилиндром (рис. 10). При соотношении  $v_0/v_{vr} = 2$  образуется замкнутая циркуляционная область вокруг цилиндра (рис. 11). При увеличении  $v_0/v_{vr}$  размеры циркуляционной области уменьшаются, начинает оказывать большее влияние ВМО. Траектории пылевых частиц имеют эллиптический вид при определенных параметрах (рис. 12). Пылевая частица может несколько раз облететь вокруг цилиндра, после чего осесть на станину станка. Циркуляционная область течения препятствует попаданию пылевых частиц во всасывающее отверстие. В этом случае пылевые частицы не улавливаются ВМО. При увеличении скорости отсоса облет пылевых частиц вокруг цилиндра не наблюдается и, начиная с определенного размера, частицы улавливаются ВМО (табл. 2).

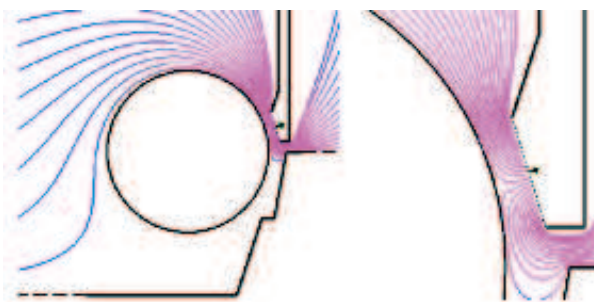


Рис. 6. Линии тока при вращении цилиндра с линейной скоростью  $v_{vr} = 0,5$  м/с и  $v_0 = 4$  м/с

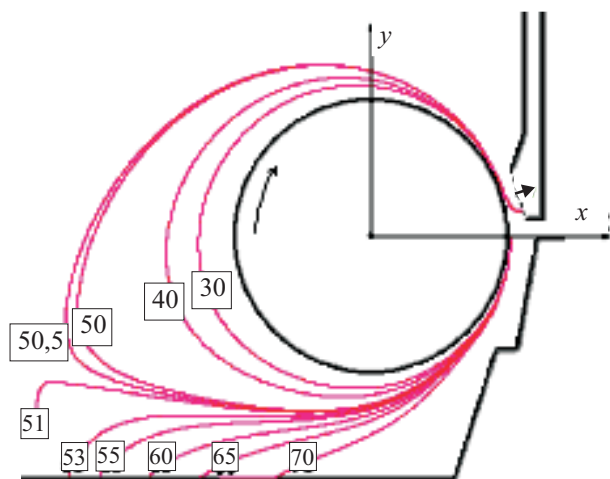


Рис. 7. Траектории пылевых частиц плотностью  $1000$  кг/м<sup>3</sup> при вращении цилиндра с линейной скоростью  $v_{vr} = 0,5$  м/с и  $v_0 = 1$  м/с

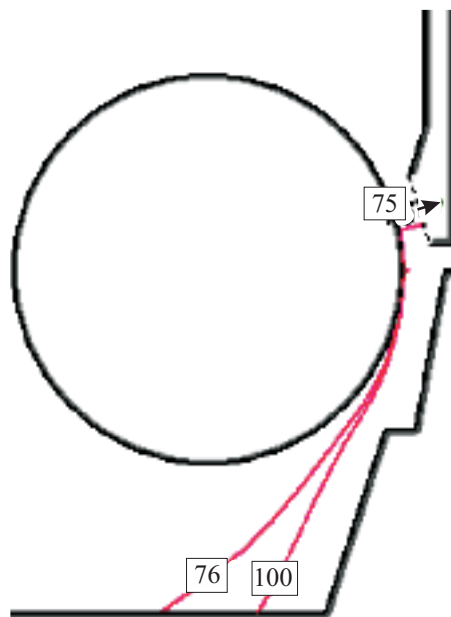


Рис. 8. Траектории пылевых частиц плотностью  $1000$  кг/м<sup>3</sup> при вращении цилиндра с линейной скоростью  $v_{vr} = 0,5$  м/с и  $v_0 = 2$  м/с

**4. Выводы.** При расчете ВМО от цилиндрической детали пренебрежение воздушным потоком, воз-

Таблица 1  
 Величины максимального диаметра пылевых частиц,  
 улавливаемых местным вентиляционным  
 отсосом схемы рис. 1

$\rho_1, \text{кг/м}^3$	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000
$v_0 = 1 \text{ м/с}, v_{vr} = 0 \text{ м/с}$							
$d_{\text{max}}, \text{мкм}$	271	180	143	121	107	97	89
$v_0 = 1 \text{ м/с}, v = 0,5 \text{ м/с}$							
$d_{\text{max}}, \text{мкм}$	50	36	29	25	23	20	19
$v_0 = 2 \text{ м/с}, v_{vr} = 0,5 \text{ м/с}$							
$d_{\text{max}}, \text{мкм}$	75	51	41	36	31	28	26

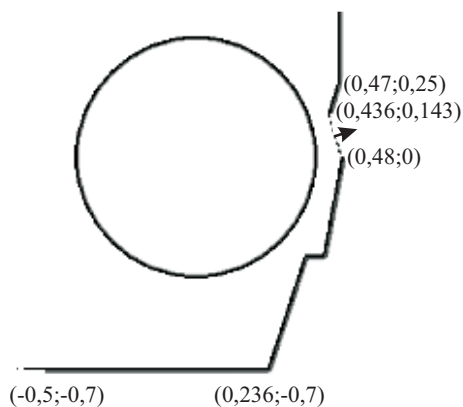


Рис. 9. Схема течения вблизи местного отсоса от вальцетокарного станка при отсутствии подсоса воздуха между ВМО и суппортом

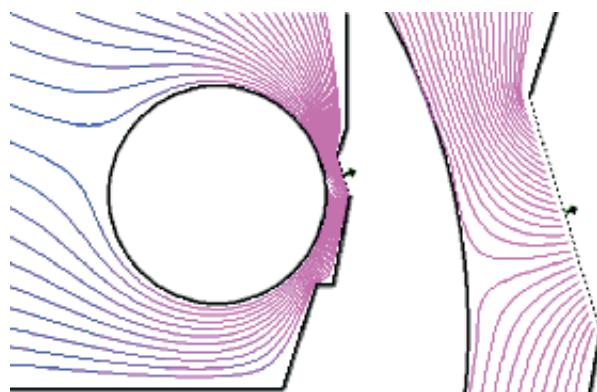


Рис. 10. Линии тока при покоящемся цилиндре и скоростью в отсосе  $v_0 = 1 \text{ м/с}$

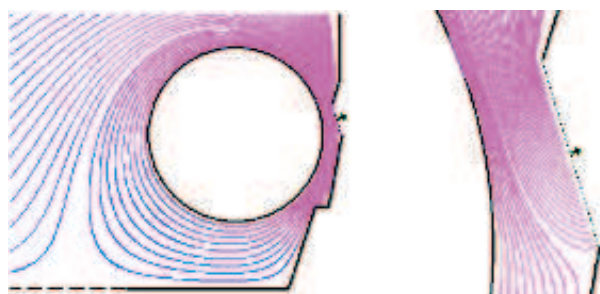


Рис. 11. Линии тока при вращении цилиндра с линейной скоростью  $v_{vr} = 0,5 \text{ м/с}$  и  $v_0 = 1 \text{ м/с}$

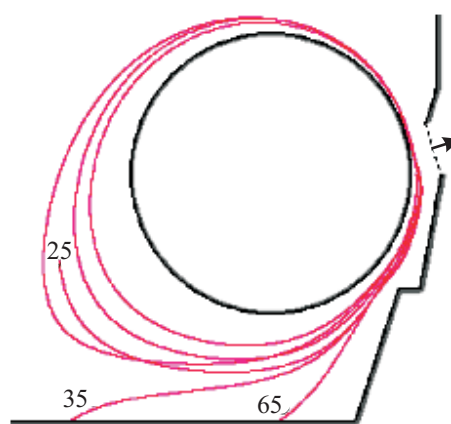


Рис. 12. Траектории пылевых частиц плотностью  $1000 \text{ кг/м}^3$  при линейной скорости вращения цилиндра  $v_{vr} = 0,5 \text{ м/с}$  и  $v_0 = 1 \text{ м/с}$

никающим в результате ее вращения, приводит к значительным погрешностям. Для определения расхода воздуха, удаляемого ВМО и необходимого для локализации пылевывделений, одним из основных показателей является отношение скорости всасывания к линейной скорости вращения цилиндра. Экранирование

Таблица 2

Величины максимального диаметра пылевых частиц,  
улавливаемых местным вентиляционным  
отсосом схемы рис. 9

$\rho_1$ , кг/м <sup>3</sup>	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000
$v_0 = 1$ м/с, $v_{vr} = 0$ м/с							
$d_{max}$ , мкм	283	188	148	126	111	101	92
$v_0 = 2$ м/с, $v_{vr} = 0,5$ м/с							
$d_{max}$ , мкм	144	99	79	68	60	55	51

вентиляционного местного отсоса и соответственно снижение подсосов воздуха повышает его эффективность. Разработанная компьютерная программа и результаты, полученные при ее использовании, могут быть полезны при проектировании эффективных энергосберегающих систем аспирации от различных видов токарных, сверлильных, шлифовальных, фрезеровальных, деревообрабатывающих и других станков с вращающимися цилиндрическими деталями.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минко В.А., Логачев И.Н., Логачев К.И. Динамика воздушных течений во всасывающих факелах местных отсосов обеспыливающей вентиляции промышленных зданий // Известия вузов. Строительство. 1996. № 10. 110–113.
2. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Механика сплошных сред. М.; Л.: Гостехиздат, 1944.
3. Коптев Д.В. Обеспыливание на электродных и электроугольных заводах. М.: Металлургия, 1980.
4. Логачев К.И. О расчете щелевых отсосов от вращающихся цилиндрических деталей // Известия вузов. Строительство. 2002. № 11. 67–73.
5. Логачев К.И., Пузанок А.И., Зоря В.Ю. Компьютерное моделирование пылегазовых потоков в пульсирующих аэродинамических полях // Вычислительные методы и программирование. 2006. 7, № 2. 65–71.
6. Воробьев Н.Д., Богданов В.С., Ельцов М.Ю. Моделирование взаимодействия мелющего тела с футеровкой трубной мельницы // Физико-математические методы в строительном материаловедении. М.: МИСИ; Белгород: БТИСМ, 1986. 168–173.

Поступила в редакцию  
08.01.2007