

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

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

УДК 533.6:628.5

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЫЛЕВОЗДУШНЫХ ТЕЧЕНИЙ В АСПИРИРУЕМОМ УКРЫТИИ

В рамках модели вязкой сжимаемой жидкости проведено изучение пространственного пылевоздушного потока в аспирационном укрытии, снабженном вращающимся цилиндром-отсосом. Были определены конструктивные и режимные параметры вращающегося цилиндра-отсоса, существенно влияющие на снижение пылеуноса в аспирационную сеть.

**Ключевые слова:** обеспыливающая вентиляция, аспорируемое укрытие, пылевые частицы, вращающийся цилиндр-отсос.

Использование аспорируемых укрытий является наиболее надежным способом локализации пылевых выбросов [1, 2]. Представляет значительный практический интерес уменьшение уноса пылевых частиц в аспирационный канал, т. е. использование укрытия в качестве ступени очистки воздуха от пыли. Для этого в работах [3, 4] предложено использовать вращающийся цилиндр-отсос (ЦО) в аспирационном укрытии для снижения пылеуноса в аспирационную сеть. При этом поле скоростей в укрытии строилось в рамках модели идеальной несжимаемой жидкости в плоском приближении методами граничных интегральных уравнений либо дискретных вихрей [5–7]. Цель настоящей работы — выявление закономерности движения пылегазового потока в аспирационном укрытии (рис. 1) с вращающимся цилиндром-отсосом и определение факторов, способствующих снижению пылеуноса в аспирационную сеть при использовании пространственной модели вязкой сжимаемой жидкости.

## ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

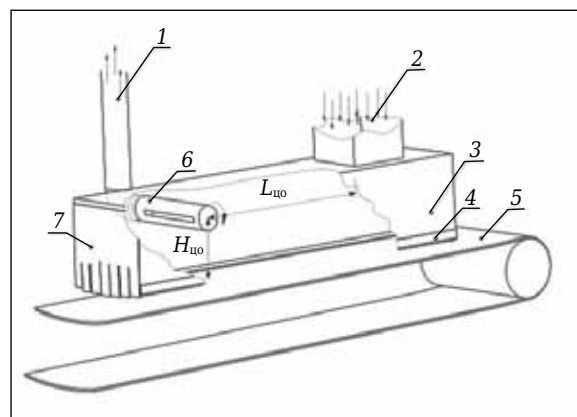
Для моделирования использовали [8]:

– уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0,$$

где  $\rho$  — плотность среды;  $t$  — время;  $u_i$  —  $i$ -я компонента скорости;  $x_i$  —  $i$ -я координата;

– уравнение Навье – Стокса при постоянной вязкости во вращающейся с угловой скоростью  $\Omega$  декартовой системе координат ( $x_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ ):



**Рис. 1.** Общий вид исследуемой конструкции укрытия: 1 — аспирационный воздуховод; 2 — загрузочный желоб; 3 — аспирационное укрытие; 4 — уплотнения; 5 — конвейерная лента; 6 — вращающийся цилиндр-отсос

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p^*}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + f_i^*,$$

где давление  $p^* = p - 0,5\rho(x_i x_j)(\Omega_k \Omega_k) + 0,5\rho(\Omega_i x_i)(\Omega_k x_k)$ ; массовые силы с кориолисовым ускорением  $f_i^* = f_i - 2\rho e_{ijk} \Omega_j u_k$ ;  $e_{ijk}$  — перестановочный оператор:

$$e_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{для } ijk = 123, 231, 312; \\ -1 & \text{для } ijk = 132, 213, 321; \\ 0 & \text{другое;} \end{cases}$$

– тензор напряжений  $\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} k \rho \delta_{ij}$ ,

где  $\mu = \mu_l + \mu_t$ ,  $\mu_l$  — коэффициент динамической вязкости;  $\mu_t$  — коэффициент турбулентной диффузии;  $\delta_{ij}$  — символ Кронекера ( $i = j \rightarrow \delta_{ij} = 1$ ,  $i \neq j \rightarrow \delta_{ij} = 0$ );

– уравнение энергии нестационарного пространственного течения:

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} ((\rho E + p) u_k + q_k - \tau_{ij} u_i) = S_k u_k + Q_H,$$

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

где  $E$  — полная энергия единичной массы текущей среды;  $u_k$  —  $k$ -я компонента скорости;  $q_k$  — диффузионный тепловой поток (нижние индексы обозначают суммирование по трем координатным направлениям);  $S_k$  — внешние массовые силы, действующие на единичную массу текущей среды;  $Q_H$  — тепло, выделяемое тепловым источником в единичном объеме текущей среды.

В соответствии с  $k - \varepsilon$  моделью турбулентности коэффициент турбулентной диффузии определяется следующим образом:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon},$$

где  $k$  — турбулентная кинетическая энергия;  $\varepsilon$  — скорость диссипации турбулентной кинетической энергии, определяемые в результате решения двух уравнений:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right],$$
$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right];$$

модельные константы:  $c_{\varepsilon 1} = 1,44$ ;  $c_{\varepsilon 2} = 1,92$ ;  $C_\mu = 0,09$ ;  $\sigma_k = 1$ ;  $\sigma_\varepsilon = 1,3$ .

Динамика пылевых частиц описывалась дифференциальным уравнением их движения, коэффициент сопротивления  $C_d$  определялся по формуле Хендерсона [8]:

$$C_d = \frac{24}{Re} + \frac{4,12}{1 + 0,03 Re + 0,48 \sqrt{Re}} + 0,38,$$

где  $Re$  — число Рейнольдса при обтекании частицы.

На основании изложенных моделей строили траектории движения среды и пылевых частиц, определяли максимальный диаметр пылевой частицы, уносимой в аспирационную сеть.

## ВЫЯВЛЕНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПЫЛЕУНОС

Исследуемым параметром является максимальный диаметр уносящихся частиц, а значит, и пылеунос в аспирационную сеть. Эти параметры зависят от многих конструктивных и режимных факторов (табл. 1).

Наряду с отмеченными в табл. 1 конструктивными и режимными факторами большое

Таблица 1. Факторы, влияющие на пылеунос при использовании цилиндра-отсоса

| Фактор | Переменная величина (наименование фактора)             | Результат анализа информации |
|--------|--------------------------------------------------------|------------------------------|
| 1      | Расход аспирируемого воздуха $Q_a$ , м <sup>3</sup> /с | 0,08–0,42                    |
| 2      | Диаметр отсоса $D_{отс}$ , м                           | 0,1–0,2                      |
| 3      | Лопатки с наружной стороны ЦО $N_{л}$ , шт.            | 0–8                          |
| 4      | Высота всасывающей щели $h_{щ}$ , м                    | 0,01–0,025                   |
| 5      | Длина всасывающей щели $l_{щ}$ , м                     | 0,1–0,45                     |
| 6      | Частота вращения ЦО $n$ , об/мин                       | 100–8000                     |
| 7      | Количество всасывающих щелей $N_{щ}$                   | 1–8                          |
| 8      | Расстояние от места загрузки до ЦО $L_{ц0}$ , м        | 0,5–1,2                      |
| 9      | Расстояние от конвейерной ленты до ЦО $H_{ц0}$ , м     | 0,3–0,55                     |

влияние на эффективность пылеулавливания оказывают плотность пыли и ее дисперсный состав. Неуправляемые факторы (вязкость, влажность, атмосферное давление воздуха) были исключены из рассмотрения. Их значения в ходе вычислительного эксперимента задавались постоянными.

Для решения задачи были приняты начальные (физические параметры среды, характерные для нормальных условий) и граничные условия исследуемой модели. В качестве граничных условий были приняты проникаемые (1 — поверхность атмосферного давления и 3 — всасывающий проем аспирационного цилиндра) и непроницаемые (поверхности твердых тел 2) плоскости, которые фактически определяют связь физических процессов в расчетной области с физическими процессами вне ее (рис. 2) при разных конструкциях вращающегося цилиндра-отсоса (рис. 3). В расчетах полагалось, что желоб имеет размеры  $0,3 \times 0,3$  м, длина укрытия 2, ширина 0,55 и высота 0,7 м. Несущая среда — воздух при стандартных условиях.

Выделение факторов, существенно влияющих на пылеунос в аспирационную сеть, было проведено при помощи планов Плакетта – Бермана. Полученные результаты легко обрабатывать, а эффекты определяются независимо.

Для того чтобы применить план типа  $N = 16$  для 15 факторов ( $N - 1$ ), к 9 действительным фак-

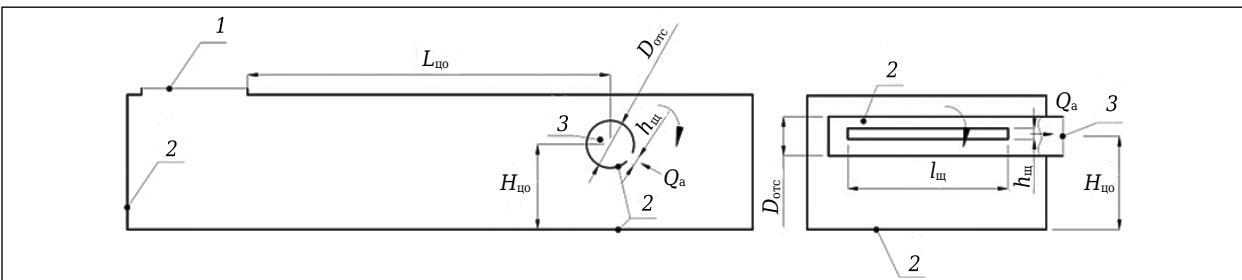


Рис. 2. Параметры аспирационного укрытия

торам (табл. 2) было добавлено еще 6 фиктивных, позволяющих оценить дисперсию ошибок наблюдений. Матрица планирования эксперимента с результатами его реализации представлена в табл. 3. В соответствии с работами [10, 11] для каждого из факторов, включенных в план эксперимента, были определены оценки эффектов и соответствующие им значения коэффициентов (рис. 4).

Данная серия экспериментов позволила установить, что на снижение пылеуноса преобладающее воздействие оказывают расход аспирируемого ЦО воздуха  $Q_a$ , диаметр цилиндра-отсоса  $D_{отс}$  и частота его вращения  $n$ . Это наглядно демонстрирует диаграмма Парето (см. рис. 4), где оценки эффектов расположены по абсолютной величине значений: от наибольших к наименьшим. Величина каждого эффекта представлена столбиком. Столбики, пересеченные линией, демонстрируют статистически значимые величины.

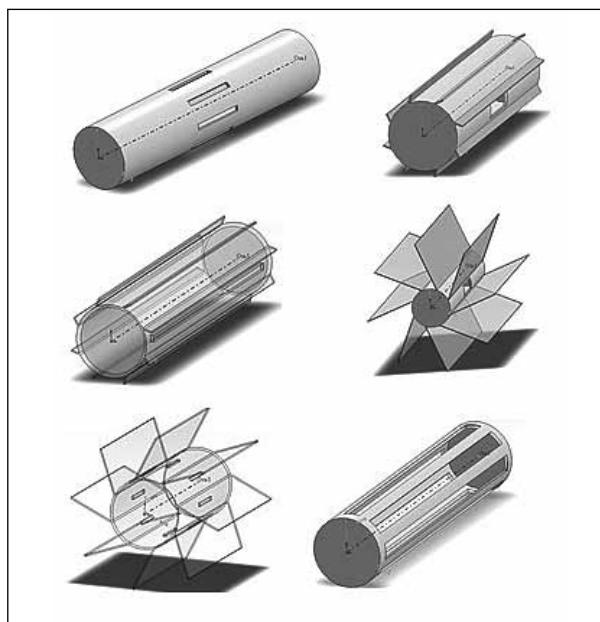


Рис. 3. Конструкции исследуемых цилиндров-отсосов

Таблица 2. Таблица уровней факторов и эффектов

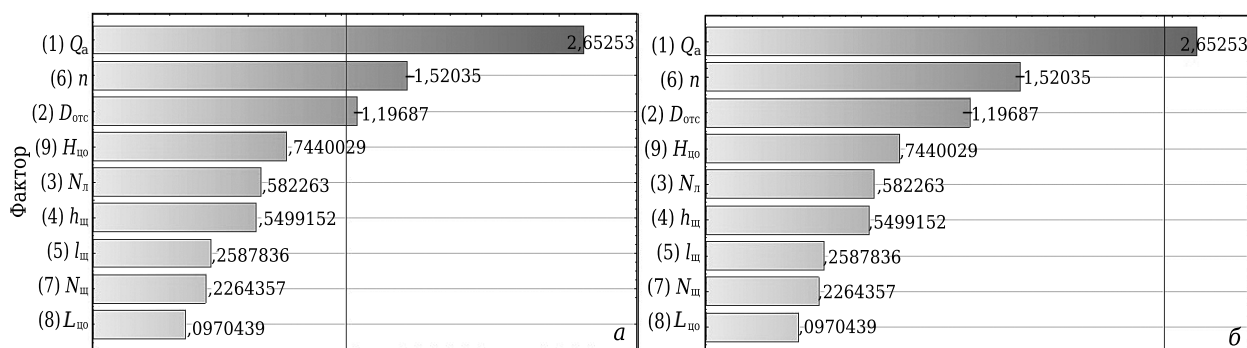
| Номер фактора | Переменная величина (фактор)                           | Уровень фактора |        |       | $p^*$    |
|---------------|--------------------------------------------------------|-----------------|--------|-------|----------|
|               |                                                        | +               | 0      | –     |          |
| 1             | Расход аспирируемого воздуха $Q_a$ , м <sup>3</sup> /с | 0,08            | 0,25   | 0,42  | 0,037900 |
| 2             | Диаметр отсоса $D_{отс}$ , м                           | 0,1             | 0,15   | 0,2   | 0,276496 |
| 3             | Лопатки с наружной стороны ЦО $N_l$ , шт.              | 0               | 4      | 8     | 0,581593 |
| 4             | Высота всасывающей щели $h_{щ}$ , м                    | 0,01            | 0,0175 | 0,025 | 0,602231 |
| 5             | Длина всасывающей щели $l_{щ}$ , м                     | 0,1             | 0,275  | 0,45  | 0,804451 |
| 6             | Частота вращения ЦО $n$ , об/мин                       | 100             | 4050   | 8000  | 0,179235 |
| 7             | Количество всасывающих щелей $N_{щ}$                   | 1               | 4,5    | 8     | 0,828380 |
| 8             | Расстояние от места загрузки до ЦО $L_{цо}$ , м        | 0,5             | 0,85   | 1,2   | 0,925852 |
| 9             | Расстояние от конвейерной ленты до ЦО $H_{цо}$ , м     | 0,3             | 0,425  | 0,55  | 0,484981 |

\*  $p$  — вероятность ошибки при отклонении нулевой гипотезы.

Таблица 3. Результаты проведенного численного эксперимента

| Номер эксперимента | Факторы                   |               |             |             |             |              |               |              |              |  | Отклики*, мкм |            |            |
|--------------------|---------------------------|---------------|-------------|-------------|-------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--|---------------|------------|------------|
|                    | $Q_a$ , м <sup>3</sup> /с | $D_{отс}$ , м | $N_l$ , шт. | $h_{щ}$ , м | $l_{щ}$ , м | $n$ , об/мин | $N_{щ}$ , шт. | $L_{цо}$ , м | $H_{цо}$ , м |  | $d_{max1}$    | $d_{max2}$ | $d_{max3}$ |
| 1                  | 0,42                      | 0,1           | 0           | 0,01        | 0,10        | 100          | 8             | 1,2          | 0,55         |  | 55            | 55         | 75         |
| 2                  | 0,08                      | 0,2           | 0           | 0,01        | 0,45        | 100          | 1             | 0,5          | 0,55         |  | 50            | 50         | 50         |
| 3                  | 0,08                      | 0,1           | 8           | 0,025       | 0,10        | 8000         | 1             | 0,5          | 0,55         |  | 35            | 35         | 40         |
| 4                  | 0,08                      | 0,1           | 8           | 0,025       | 0,10        | 100          | 1             | 1,2          | 0,55         |  | 30            | 30         | 45         |
| 5                  | 0,42                      | 0,1           | 8           | 0,01        | 0,45        | 8000         | 1             | 1,2          | 0,30         |  | 45            | 45         | 100        |
| 6                  | 0,42                      | 0,2           | 8           | 0,025       | 0,45        | 8000         | 8             | 1,2          | 0,55         |  | 50            | 50         | 100        |
| 7                  | 0,42                      | 0,1           | 8           | 0,01        | 0,45        | 100          | 1             | 0,5          | 0,30         |  | 45            | 45         | 70         |
| 8                  | 0,08                      | 0,2           | 0           | 0,01        | 0,45        | 8000         | 1             | 1,2          | 0,55         |  | 0             | 0          | 0          |
| 9                  | 0,42                      | 0,1           | 0           | 0,01        | 0,10        | 8000         | 8             | 0,5          | 0,55         |  | 55            | 55         | 70         |
| 10                 | 0,08                      | 0,1           | 0           | 0,025       | 0,45        | 100          | 8             | 0,5          | 0,30         |  | 35            | 35         | 35         |
| 11                 | 0,42                      | 0,2           | 0           | 0,025       | 0,10        | 100          | 1             | 1,2          | 0,30         |  | 55            | 55         | 55         |
| 12                 | 0,08                      | 0,2           | 8           | 0,01        | 0,10        | 100          | 8             | 1,2          | 0,30         |  | 30            | 30         | 40         |
| 13                 | 0,08                      | 0,1           | 0           | 0,025       | 0,45        | 8000         | 8             | 1,2          | 0,30         |  | 35            | 35         | 40         |
| 14                 | 0,42                      | 0,2           | 0           | 0,025       | 0,10        | 8000         | 1             | 0,5          | 0,30         |  | 30            | 80         | 100        |
| 15                 | 0,42                      | 0,2           | 8           | 0,025       | 0,45        | 100          | 8             | 0,5          | 0,55         |  | 45            | 45         | 55         |
| 16                 | 0,08                      | 0,2           | 8           | 0,01        | 0,10        | 8000         | 8             | 0,5          | 0,30         |  | 0             | 0          | 0          |

\*  $d_{max1}$  — максимальный диаметр частиц, уносящихся в аспирационную сеть, при граничном условии на стенке «поглощение»;  $d_{max2}$  — при граничном условии на стенке «неидеальное отражение»;  $d_{max3}$  — при граничном условии на стенке «идеальное отражение».



**Рис. 4.** Диаграмма Парето при  $p = 0,3$  (а) и  $p = 0,05$  (б);  $p$  — вероятность ошибки при отклонении нулевой гипотезы. В скобках указан номер фактора (см. табл. 2)

Для  $D_{отс}$  и  $d_{max}$  коэффициент корреляции  $r = -0,28$ , что означает, что с увеличением значений одной переменной значения другой убывают. Для  $n$  и  $d_{max}$  коэффициент корреляции  $r = 0,36$ , т. е. с увеличением одной величины другая будет возрастать.

В ходе проведенного дисперсионного анализа (ANOVA — Analysis of Variation) установлена значи-

мость различия между средними значениями исследуемых факторов с помощью сравнения их дисперсий. Результаты дисперсионного анализа и оценки эффектов представлены в табл. 4, оценки значимости факторов эксперимента — в табл. 5. На основании полученных результатов и данных вычислительного эксперимента построены графики (рис. 5).

**Таблица 4. Результаты дисперсионного анализа\***<sup>1</sup>

| Фактор* <sup>2</sup> | SS       | df | MS      | F        | p        |
|----------------------|----------|----|---------|----------|----------|
| (1) $Q_a$            | 1681,00  | 1  | 1681,00 | 7,035926 | 0,037900 |
| (2) $D_{отс}$        | 342,250  | 1  | 342,250 | 1,432508 | 0,276496 |
| (3) $N_{л}$          | 81,000   | 1  | 81,000  | 0,339030 | 0,581593 |
| (4) $h_{щ}$          | 71,250   | 1  | 72,250  | 0,302407 | 0,602231 |
| (5) $l_{щ}$          | 16,000   | 1  | 16,000  | 0,066960 | 0,804451 |
| (6) $n$              | 552,250  | 1  | 552,250 | 2,311475 | 0,179235 |
| (7) $N_{щ}$          | 12,250   | 1  | 12,250  | 0,051273 | 0,828380 |
| (8) $L_{цo}$         | 2,250    | 1  | 2,250   | 0,009418 | 0,925852 |
| (9) $H_{цo}$         | 132,250  | 1  | 132,250 | 0,553540 | 0,484981 |
| Ошибка               | 1433,500 | 6  | 238,917 |          |          |
| Итого                | 4325,000 | 15 |         |          |          |

\*<sup>1</sup> SS — сумма квадратов; df — степень свободы; MS — средние величины квадратов; F — распределение нулевой гипотезы; p — вероятность ошибки при отклонении нулевой гипотезы; величина достоверности аппроксимации R-sqr = 0,66855.

\*<sup>2</sup> В скобках указан номер фактора (см. табл. 2).

**Таблица 5. Оценка значимости факторов эксперимента\***<sup>1</sup>

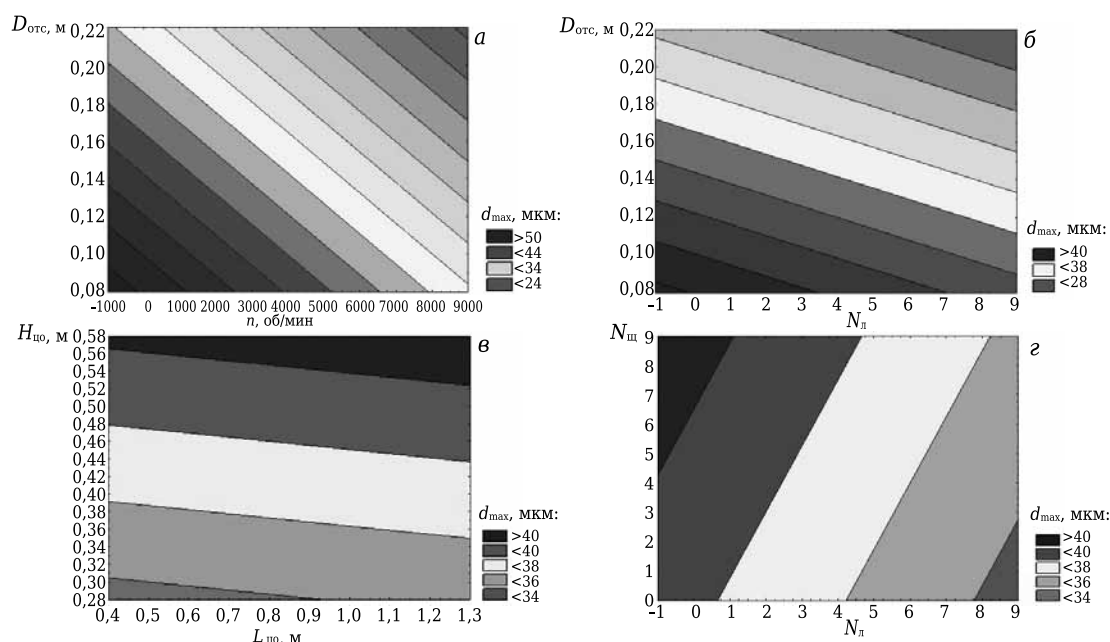
| Фактор* <sup>2</sup>                    | Оценка эффекта | Стандартная ошибка | Наблюдаемое значение критерия Стьюдента* <sup>3</sup> | Уровень значимости p | Интервал коэффициентов, % |          | Коэффициент для кодированной модели | Стандартная ошибка оценок параметров |
|-----------------------------------------|----------------|--------------------|-------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------|----------|-------------------------------------|--------------------------------------|
|                                         |                |                    |                                                       |                      | -95                       | +95      |                                     |                                      |
| Среднее и свободное значение переменных | 37,25          | 3,864232           | 9,63969                                               | 0,000071             | 27,7946                   | 46,70544 | 37,25                               | 3,864232                             |
| (1) $Q_a$                               | 20,5           | 7,728465           | 2,65253                                               | 0,0379               | 1,5891                    | 39,41087 | 10,25                               | 3,864232                             |
| (2) $D_{отс}$                           | -9,25          | 7,728465           | -1,19687                                              | 0,276496             | -28,1609                  | 9,66087  | -4,625                              | 3,864232                             |
| (3) $N_{л}$                             | -4,5           | 7,728465           | -0,58226                                              | 0,581593             | -23,4109                  | 14,41087 | -2,25                               | 3,864232                             |
| (4) $h_{щ}$                             | 4,25           | 7,728465           | 0,54992                                               | 0,602231             | -14,6609                  | 23,16087 | 2,125                               | 3,864232                             |
| (5) $l_{щ}$                             | 2,0            | 7,728465           | 0,25878                                               | 0,804451             | -16,9109                  | 20,91087 | 1,0                                 | 3,864232                             |
| (6) $n$                                 | -11,75         | 7,728465           | -1,52035                                              | 0,179235             | -30,6609                  | 7,16087  | -5,875                              | 3,864232                             |
| (7) $N_{щ}$                             | 1,75           | 7,728465           | 0,22644                                               | 0,828380             | -17,1609                  | 20,66087 | 0,875                               | 3,864232                             |
| (8) $L_{цo}$                            | 0,75           | 7,728465           | 0,09704                                               | 0,925852             | -18,1609                  | 19,66087 | 0,375                               | 3,864232                             |
| (9) $H_{цo}$                            | 5,75           | 7,728465           | 0,74400                                               | 0,484981             | -13,1609                  | 24,66087 | 2,875                               | 3,864232                             |

\*<sup>1</sup> Величина достоверности аппроксимации R-sqr = 0,66855 (значение коэффициента детерминации умеренное); остаток среднего квадрата MS Residual = 238,9167.

\*<sup>2</sup> В скобках указан номер фактора (см. табл. 2).

\*<sup>3</sup> В скобках указано число степеней свободы.





**Рис. 5.** Зависимость максимального диаметра уносящихся частиц  $d_{\max}$  от числа оборотов вращения ЦО  $n$  и его диаметра  $D_{\text{отс}}$  (а), количества лопаток  $N_{\text{л}}$  и диаметра ЦО  $D_{\text{отс}}$  (б),  $H_{\text{ц}}$  и  $L_{\text{ц}}$  (в),  $N_{\text{л}}$  и  $N_{\text{щ}}$  (г)

Увеличение диаметра ЦО оказывает влияние на снижение  $d_{\max}$  (см. рис. 5), что объясняется усилением действия центробежной силы с увеличением радиуса вращения, за счет воздействия которой повышается сепарация частиц из пылевоздушного потока.

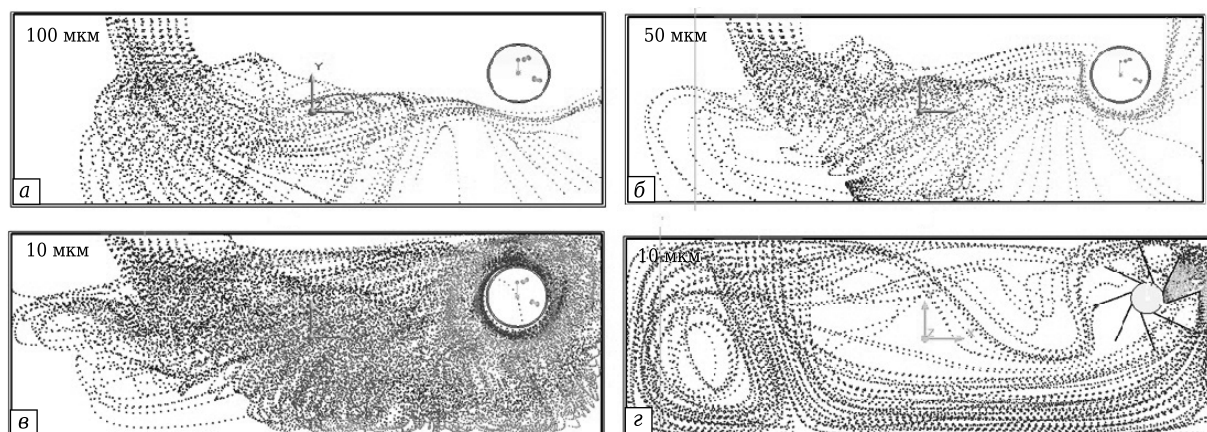
Увеличение числа оборотов вращения ЦО, так же как и его диаметра, приводит к снижению  $d_{\max}$  (см. рис. 5, а). Данное явление можно объяснить увеличением скорости вращения воздушного потока за счет взаимодействия с ЦО и, как следствие, увеличением центробежных сил, действующих на частицы пыли.

Увеличение количества лопаток (см. рис. 5, б) приводит к незначительному снижению  $d_{\max}$ . Наличие лопаток увеличивает центробежные силы, однако за лопатками возникают зоны разрежения, что приводит к увлечению пылевых частиц в межлопаточное пространство, а затем и в ЦО.

Положение ЦО в полости укрытия при использовании предложенной схемы компоновки аспи-

рационного укрытия оказывает незначительное влияние на  $d_{\max}$  (см. рис. 5, в). Минимальные значения  $d_{\max}$  характерны для частиц, приближенных к желобу и к приконвейерной области. Это объясняется формированием устойчивого вращения воздушного потока, увеличением расстояния полета частиц и попадания частиц в пристенные области, в которых они оседают. Цилиндр-отсос находится в вихревой зоне, формируемой течением эжекционного воздуха, что способствует большому закручиванию воздушного потока.

Увеличение количества всасывающих щелей (см. рис. 5, г) в ЦО не оказывает существенного влияния на процесс сепарации пыли из воздушного потока, что подтверждается данными табл. 3 и 4, но в то же время повышает  $d_{\max}$ . Это может быть обусловлено увеличением площади всасывания и, как следствие, повышением вероятности попадания частиц пыли в ЦО. Некоторые расчетные картины движения пылевых частиц показаны на рис. 6.



**Рис. 6.** Траектории пылевых частиц (диаметр указан на рисунке): а–в — граничное условие на стенках — поглощение (см. табл. 3, № 8); г — граничное условие на стенках — идеальное отражение (см. табл. 3, № 4)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено компьютерное моделирование пылевоздушного потока в аспирируемом укрытии, снабженном вращающимся цилиндром-отсосом. Были использованы трехмерная модель течения вязкой сжимаемой среды и дифференциальные уравнения динамики пылевых частиц. Планирование вычислительного эксперимента осуществлялось при помощи плана Плакетта – Бермана. Анализ результатов вычислительных экспериментов позволил выделить три основных фактора, оказывающих значимое влияние на максимальный диаметр частиц, уносящихся в аспирационную сеть, соответственно, и на пылеунос в аспирационную воронку:

- объем аспирируемого воздуха,
- диаметр цилиндра-отсоса,
- частота вращения цилиндра-отсоса.

Максимальный диаметр пылевой частицы, уносимой в аспирационную сеть, снижается при уменьшении первого фактора и при увеличении остальных. При высоких оборотах вращения цилиндра-отсоса можно добиться полного осаждения пылевых частиц на дно аспирационного укрытия. Несущественного снижения

максимального диаметра пылевой частицы можно добиться за счет увеличения количества лопаток на внешней стороне цилиндра-отсоса, а также при его смещении к загрузочному желобу и при приближении к конвейерной ленте, но это чревато выбиванием пыли через неплотности аспирируемого укрытия. Таким образом, цилиндр-отсос предлагается размещать в области центрального вихря, образующегося в аспирационном укрытии.

Проведенные ранее исследования пылевоздушных течений в аспирируемых укрытиях в рамках двумерной модели идеальной несжимаемой жидкости, реализованной методами граничных интегральных уравнений и дискретных вихрей, не вступают в противоречия с приведенными в данной статье, за исключением рекомендуемого места расположения цилиндра-отсоса. Заметим, что ряд факторов ранее не учитывали: количество щелей и лопаток, длину и ширину щели, хотя, как выяснилось, они несущественно влияют на пылеунос в аспирационную сеть.

\* \* \*

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-08-00074а) и стипендии президента РФ СП-121.2016.1.

## Библиографический список

1. **Киреев, В. М.** Расчет и разработка аспирационных укрытий / В. М. Киреев, А. Б. Гольцов, В. А. Минко // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2010. — № 3. — С. 143–146.
2. **Гольцов, А. Б.** Исследование конструкции аспирационного укрытия для применения в стесненных условиях / А. Б. Гольцов, В. М. Киреев, А. Ю. Феоктистов // Экология промышленного производства. — 2013. — № 1 (81). — С. 2–5.
3. **Логачёв, И. Н.** Методы снижения энергоемкости систем аспирации. Часть 4. Теоретические предпосылки создания пылелокализирующих устройств с закрученными воздушными потоками / И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова [и др.] // Новые огнеупоры. — 2014. — № 8. — С. 53–58.
- Logachev, I. N.** Methods of reducing the power requirements of ventilation systems. Part 4. Theoretical prerequisites for the creation of dust localizing devices with swirling air flows / I. N. Logachev, K. I. Logachev, O. A. Averkova [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 55, № 4. — P. 365–370.
4. **Logachev, I. N.** Local exhaust ventilation: aerodynamic processes and calculations of dust emissions / I. N. Logachev, K. I. Logachev, O. A. Averkova. — Boca Raton : CRC Press, 2015. — 576 p.
5. **Аверкова, О. А.** Моделирование воздушных течений на входе в местные вентиляционные отсосы в виде раструба / О. А. Аверкова, А. Э. Канар, Е. И. Тол-

- мачёва // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2015. — № 1. — С. 175–181.
6. **Аверкова, О. А.** Имитационное моделирование эжекции воздуха в круглой трубе с байпасной камерой / О. А. Аверкова, А. Э. Канар, Е. И. Толмачёва // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2015. — № 2. — С. 207–211.
7. **Аверкова, О. А.** О воздушном экранировании местного вентиляционного отсоса-раструба в неограниченном пространстве / О. А. Аверкова, А. Э. Канар, Е. И. Толмачёва // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2015. — № 3. — С. 173–178.
8. **Алямовский, А. А.** Компьютерное моделирование в инженерной практике (Solid Works 2007/2008) / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов [и др.]. — СПб. : БХВ-Петербург, 2008. — 1040 с.
9. **Henderson, C. B.** Drag coefficients of spheres in continuum and rarefied flows / C. B. Henderson // AIAA Journal. — 1976. — Vol. 14, № 6. — P. 103–112.
10. **Хартман, К.** Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шефер [и др.]. — М. : Мир, 1977. — 552 с.
11. **Халафян, А. А.** Статистический анализ данных (Statistica 6) / А. А. Халафян. — М. : Бинوم-Пресс, 2007. — 512 с. ■

Получено 12.01.16

© А. Б. Гольцов, К. И. Логачёв,  
О. А. Аверкова, 2016 г.