

УДК 533.6:628.5

## К ВОПРОСУ О МОДЕЛИРОВАНИИ ПЫЛЕГАЗОВЫХ ПОТОКОВ В АСПИРАЦИОННОМ УКРЫТИИ

О. А. Аверкова<sup>1</sup>, В. Ю. Зоря<sup>1</sup>, И. Н. Логачев<sup>1</sup>, К. И. Логачев<sup>1</sup>

Построены трехмерные поля скоростей и давления внутри аспирационного укрытия на основе численного решения осредненного по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса методом крупных вихрей и использования программы Fluent. Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 08–08–13687–офиц) и международной обменной программы Fulbright.

**Ключевые слова:** вычислительная гидродинамика, осредненное по Рейнольдсу уравнение Навье–Стокса, метод крупных вихрей, программа Fluent, аспирационное укрытие.

**Введение.** Системы аспирации служат для предотвращения загрязнения помещений пылевыми выбросами — путем локализации пылевых выделений с последующей транспортировкой по воздуховодам и очисткой загрязненного воздуха в пылеочистных аппаратах. Основным устройством для локализации выбросов пыли является аспирационное укрытие, исключающее вынос пыли из зоны ее образования в окружающее пространство. Для проектирования оптимальных аспирационных укрытий необходимы наиболее точные сведения о характеристике воздушных течений и поведении аэрозольных частиц внутри этих укрытий. Кроме того, для выбора наиболее эффективных пылеочистных аппаратов необходимы надежные данные о дисперсном составе и концентрации пыли в аспирационных патрубках укрытий. Поэтому проблеме моделирования пылегазовых потоков в аспирационном укрытии посвящено большое количество научных

трудов. Аэродинамику внутри укрытия исследовали в плоском приближении, используя метод гиперболического приближения [1], метод граничных интегральных уравнений [2–4], метод дискретных вихрей [5–8], путем решения уравнения Навье–Стокса в приближении Буссинеска–Обербека [9]. Закономерности динамики пылевых аэрозолей определяли методами наибольшего диаметра [1–3], критических траекторий [4], полифракционной совокупности [5–8], путем решения двумерного уравнения диффузии [9].

Аналитического или численного расчета полей скоростей, давления и поведения пылевых аэрозолей внутри аспирационного укрытия в трехмерном представлении не существует.

Поэтому целью данной статьи является моделирование трехмерных пылегазовых потоков внутри аспирационных укрытий на основе современных методов вычислительной гидроаэродинамики и программного продукта Fluent.

**1. Постановка задачи. Основные уравнения.** Физическая постановка задачи состоит в определении полей скоростей, давления и траекторий пылевых частиц разных фракций для укрытия, изображенного на рис. 1. Здесь в крышке укрытия заданы два прямоугольных проема. В первый проем воздух поступает из желоба размером 0.5 × 0.3 м со скоростью 3.9 м/с, а второй проем представляет собой входное сечение аспирационного патрубка, через которое воздух удаляется со средней скоростью 1.04 м/с. Таким образом, по желобу поступает 0.585 м<sup>3</sup>/с воздуха и столько же удаляется аспирационным патрубком.

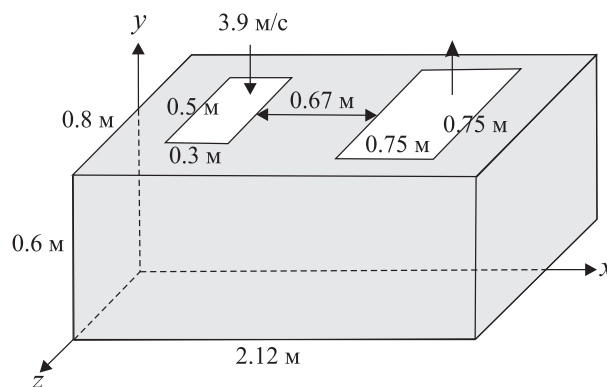


Рис. 1. Постановка задачи

<sup>1</sup> Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, ул. Костюкова, 46, 308012, г. Белгород; Аверкова О. А., ст. препод., e-mail: olga\_19572004@mail.ru; Зоря В. Ю., аспирант, e-mail: violetta.zorya@mail.ru; Логачев И. Н., профессор, e-mail: kilogachev@intbel.ru; Логачев К. И., профессор, e-mail: kilogachev@intbel.ru

Для решения этой задачи использовались два метода: RANS (Reynolds Averaged Navier–Stokes) и LES (Large Eddy Simulation).

Для моделирования методом RANS использовались стандартная модель  $k - \varepsilon$  турбулентности, осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса и неразрывности:

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

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( -\rho \overline{u'_i u'_j} \right).$$

Здесь скорость  $u$ , давление  $p$  и плотность  $\rho$  осреднены по времени. Напряжения Рейнольдса  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$  определяются в рамках стандартной  $k - \varepsilon$  модели турбулентности [10, 11]

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \rho \varepsilon + \tau_{ij} \frac{\partial(u_i)}{\partial x_j},$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k},$$

где  $\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \rho \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$ ,  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ ,  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ,  $C_\mu = 0.09$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ .

Уравнения, лежащие в основе метода LES, получены фильтрованием нестационарных уравнений Навье–Стокса и неразрывности.

Процесс фильтрования состоит в удалении из рассмотрения вихрей, размер которых меньше размера ячеек разностной сетки. Фильтрованная переменная определяется из выражения

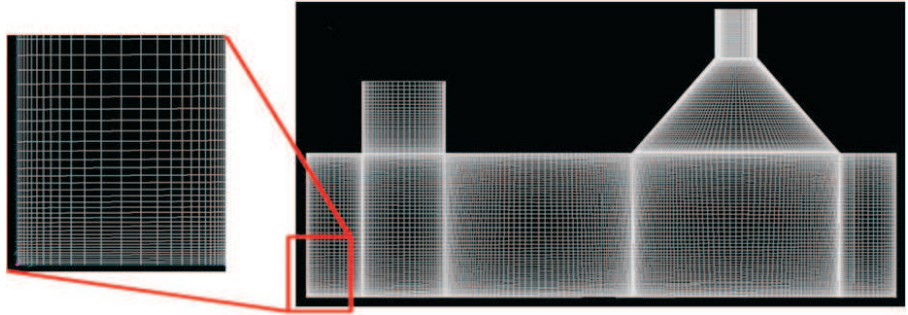


Рис. 2. Схематическое изображение трехмерной сетки

$$\overline{\varphi}(x, y, z) = \frac{1}{V} \iiint_V \varphi(x', y', z') dx' dy' dz',$$

где  $(x', y', z') \in V$ ,  $V$  — объем вычислительной ячейки, или по-другому, масштаб турбулентности, допустимый фильтр.

Уравнения неразрывности и Навье–Стокса в этом случае принимают вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \overline{u}_i) = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u}_i \overline{u}_j) = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho (\overline{u_i u_j} - \overline{u}_i \overline{u}_j) \right].$$

Для определения траекторий пылевых частиц использовались уравнения их движения в декартовой системе координат:  $\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = F_D(\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) + \frac{\mathbf{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p}$ , где

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D \text{Re}}{24}, \quad \text{Re} = \frac{\rho d_p |\mathbf{u} - \mathbf{u}_p|}{\mu}, \quad C_D = \frac{24}{\text{Re}} (1 + b_1 \text{Re}^{b_2}) + \frac{b_3 \text{Re}}{b_4 + \text{Re}},$$

$$b_1 = \exp(2.3288 - 6.4581\phi + 2.4486\phi^2), \quad b_2 = 0.0964 + 0.5565\phi,$$

$$b_3 = \exp(4.905 - 13.8944\phi + 18.4222\phi^2 - 10.2599\phi^3),$$

$$b_4 = \exp(1.4681 - 12.2584\phi + 20.7322\phi^2 - 15.8855\phi^3);$$

$\phi = \frac{s}{S}$  — фактор формы;  $s$  — поверхность сферы того же объема, что и частица;  $S$  — фактическая площадь поверхности частицы;  $\mathbf{u}_p$  и  $\mathbf{u}$  — скорость частицы и среды соответственно;  $\mu$  — молекулярная вязкость среды;  $\rho_p$  и  $\rho$  — плотность частицы и среды соответственно;  $d_p$  — диаметр частицы.

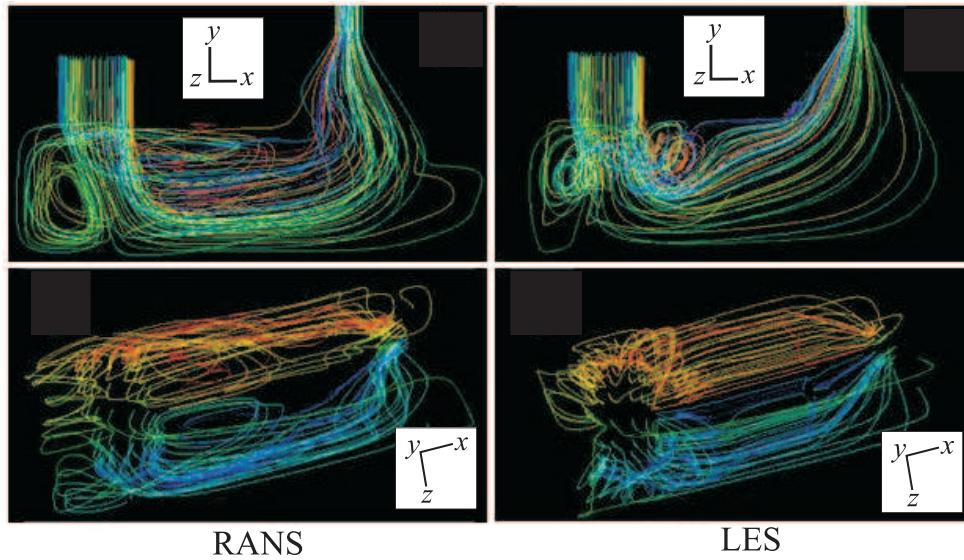


Рис. 3. Линии тока в аспирационном укрытии, построенные разными методами

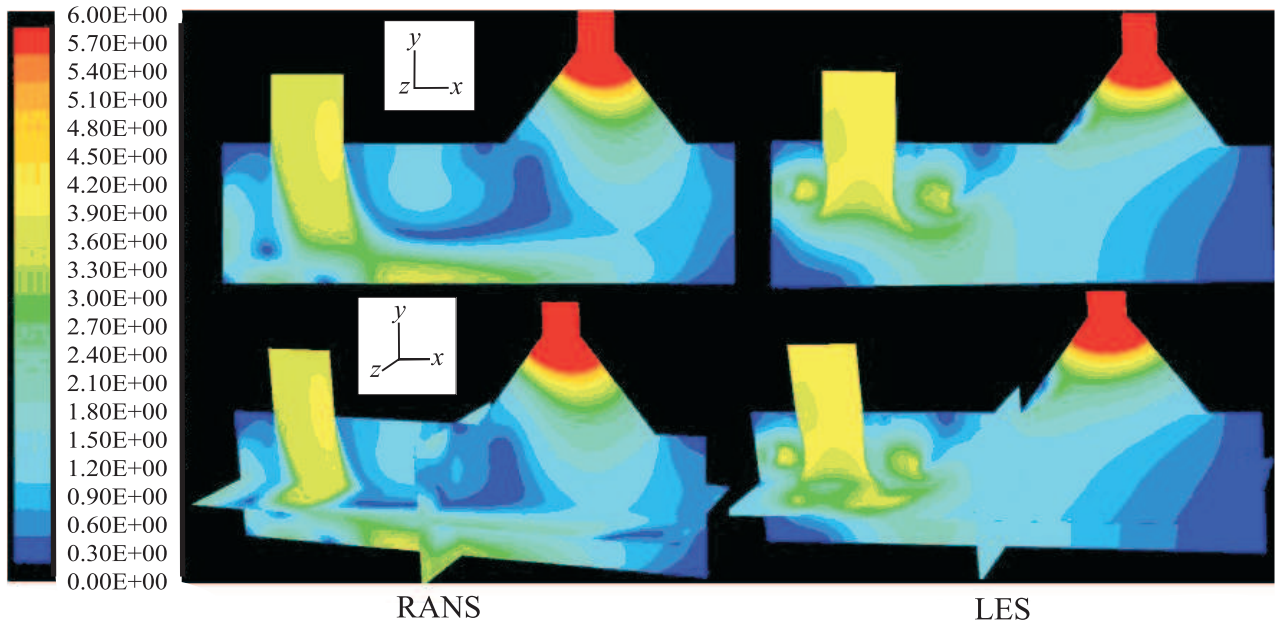


Рис. 4. Поля абсолютных величин скорости [м/с]

**2. Результаты расчетов и их обсуждение.** Расчеты производились для укрытия, изображенного на рис. 1 при следующих параметрах: кинетическая энергия турбулентности  $1 \text{ м}^2/\text{с}^2$ ; норма турбулентной диссипации  $1 \text{ м}^2/\text{с}^3$ ; плотность воздуха  $1.225 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; плотность частицы  $3500 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; вязкость воздуха  $1.7894 \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$ .

Для генерации расчетной сетки использовалась программа Gambit. Построенная трехмерная сетка (рис. 2) содержит 2 600 000 узлов. Для корректного описания поведения потока в пограничных слоях плотность узлов сетки на границах конструкции увеличена в несколько раз.

Качественно картина в обоих методах моделирования RANS и LES схожа (см. рис.3). В укрытии наблюдаются два крупномасштабных вихря: первый — центральный вихрь между приточным и вытяжным отверстиями и верхней стенкой; второй — вблизи левой стенки. Учитывая то, что каждой линии тока

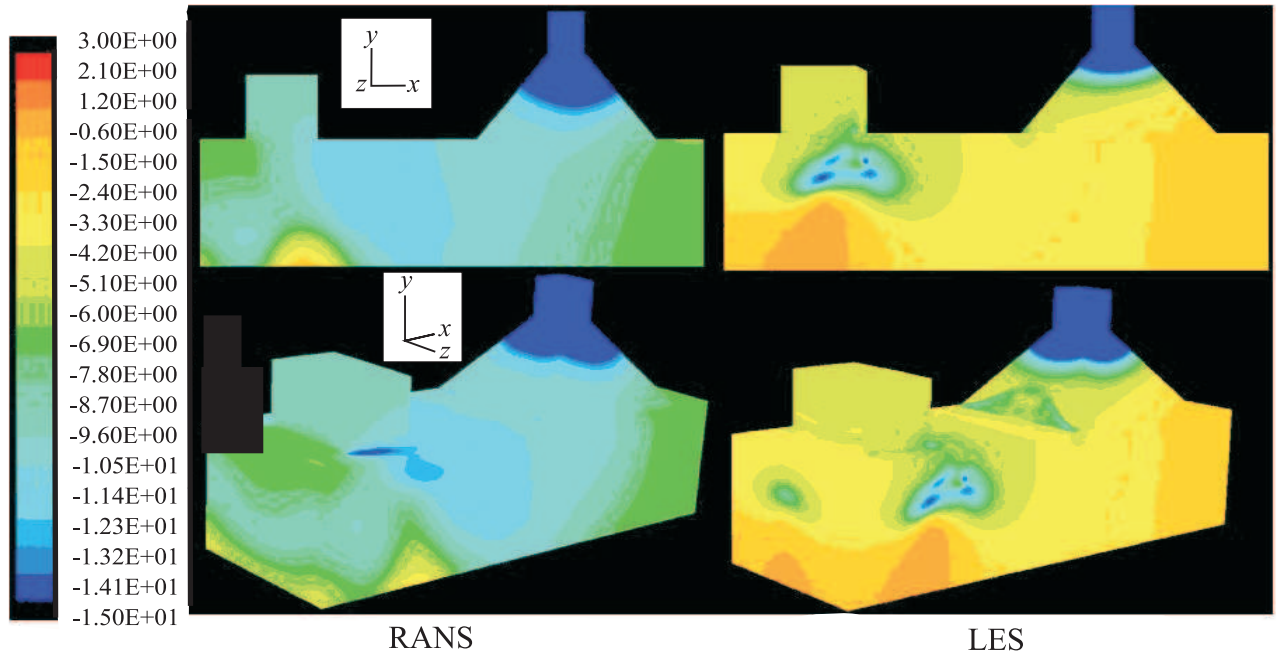
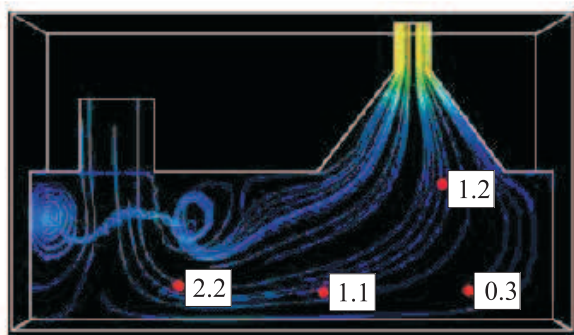
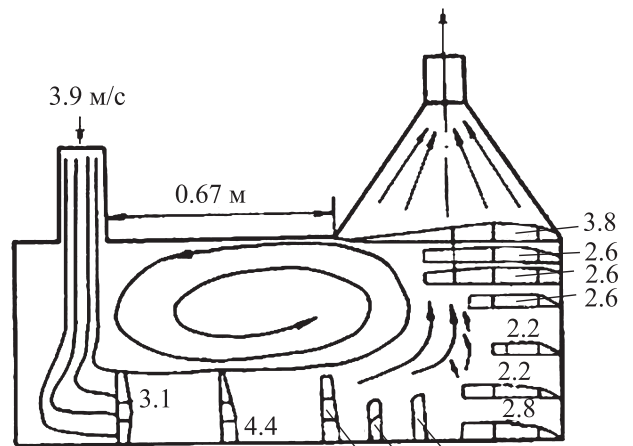


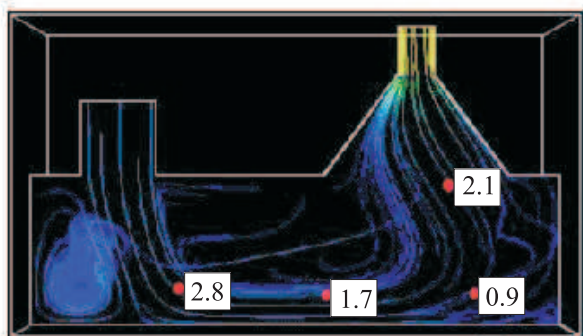
Рис. 5. Поля статических давлений [Па]



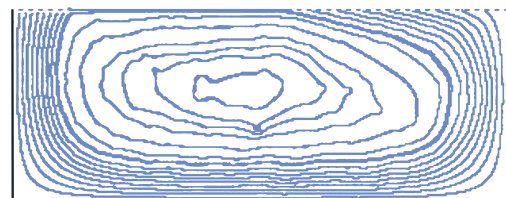
а)



в)



б)



г)

Рис. 6. Картины течения в аспирационном укрытии, полученные: а) методом LES; б) методом RANS; в) экспериментально; г) методом дискретных вихрей

соответствует определенный цвет, можно сделать вывод, что в обоих методах цветовая гамма разных областей течения совпадает.

Тем не менее, можно заметить, что размеры и расположение вихревых областей отличаются. Для метода LES (в момент времени 1.26 с) вихревые образования локализованы возле входного отверстия, в

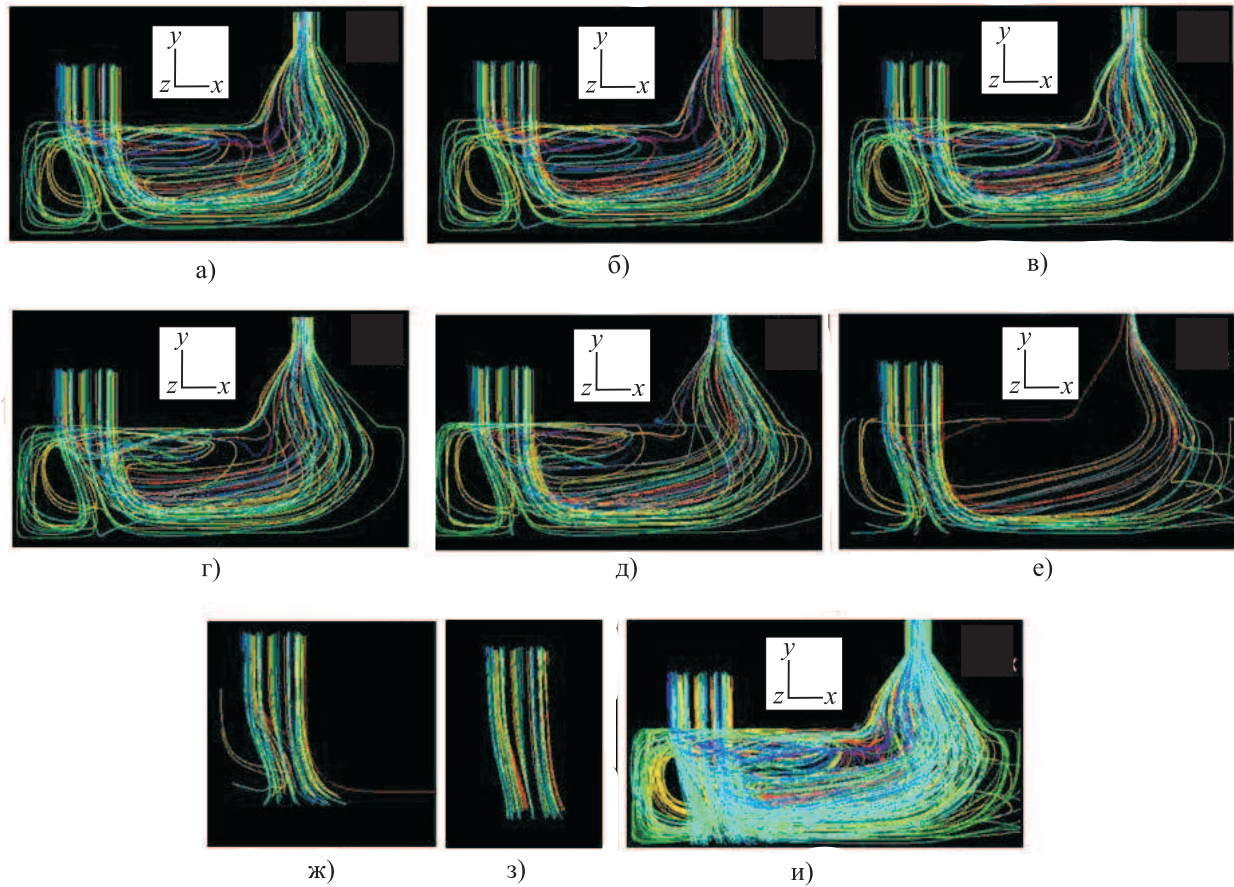


Рис. 7. Траектории пылевых частиц разных диаметров: а) 1 мкм; б) 3–5 мкм; в) 5–10 мкм; г) 10–20 мкм; д) 20–40 мкм; е) 40–60 мкм; ж) 60–100 мкм; з) 100–300 мкм; и) всех размеров

тоже время при моделировании методом RANS вихри более размазаны по пространству. Кроме того, для фиксированного количества линий тока наибольшая их плотность для метода LES наблюдается у верха конструкции, в то время как для RANS линии тока относительно равномерно распределены по конструкции. Очевидно, что плотность и структура линий тока зависит от структуры вихревых образований у входного отверстия. Относительно пространственной структуры линий тока можно отметить, что для метода LES вихри образуются по всему периметру приточного отверстия, в то время как для метода RANS вихри образуются лишь вдоль основного направления линий тока к выходному отверстию.

Анализ поля статического давления в конструкции (рис. 5) проводился в сравнении с полем скоростей (рис. 4). Заметим, что в большей части объема конструкции аспирационного укрытия течение является ламинарным. Следовательно, качественно связь статического давления со скоростью может быть проведена на основании закона Бернулли (сумма статического и динамического давлений есть величина постоянная). Из картин поля скоростей, построенных по методу LES, видно, что начиная с приточного отверстия значения абсолютной величины скорости (а значит, и динамического давления) убывают вдоль линий тока. По мере приближения к вытяжному отверстию абсолютная величина скорости возрастает и становится максимальной на выходе (динамическое давление в данной точке является максимальным). В связи с этим изменение статического давления будет иметь обратную зависимость, т.е. в областях с низкой скоростью течения статическое давление возрастает, и наоборот. Статическое давление возрастает от входного отверстия по направлению к вытяжному вдоль линий тока и начинает убывать у самого вытяжного отверстия до минимального значения. Отдельно заметим, что в вихревых областях наблюдается повышенная скорость и, как следствие, пониженное статическое давление. Аналогично по углам конструкции абсолютная величина скорости является низкой, что приводит к увеличению статического давления.

Для результатов моделирования методом RANS характерна аналогичная зависимость между величиной скорости и статическим давлением. Что касается величины статического давления для обоих методов, то для LES-моделирования статическое давление в среднем выше, чем для RANS-моделирования

за исключением вытяжного отверстия.

Из найденных полей абсолютных величин скорости также заметно значительное снижение величин скорости в вихревых областях по методу RANS и повышенное значение этих величин по методу LES. Кроме того, по методу LES наблюдается сразу при выходе из приточного отверстия зона разрежения, отсутствующая при моделировании по методу RANS.

Заметим, что в сравнении с экспериментальной картиной течения (рис. 6), полученной А. П. Колесник, выигрывает метод RANS. В расчетах по методу дискретных вихрей также наблюдается центральный вихрь значительных размеров. Отметим также неравномерность всасывания, которая подтверждается обоими методами и экспериментальными исследованиями. Здесь визуализация результатов моделирования (рис. 6а и 6б) осуществлялась при помощи программы Fieldview.

При найденном поле скоростей методом RANS были построены траектории пылевых частиц разных размеров (рис. 7). При мелких фракциях пылевых частиц их траектории достаточно близки к линиям тока. Начиная с размера пылинок в 40 мкм, вихри перестают вовлекать пылевые частицы в движение по замкнутым траекториям (рис. 7е), и, начиная с диаметра 60 мкм, частицы оседают на дно укрытия. В расчетах поля скоростей по методу дискретных вихрей максимальный размер улавливаемой пылевой частицы также составлял 60 мкм.

**Заключение.** На основе численного решения осредненного по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса (RANS — Reynolds Averaged Navier-Stokes) и нестационарного уравнения Навье–Стокса методом крупных вихрей (LES — Large Eddy Simulation) с использованием суперкомпьютера университета штата Кентукки, США, и компьютерной программы Fluent определены трехмерные поля скоростей и давления внутри аспирационного укрытия. Осредненные трехмерные турбулентные характеристики поля скоростей и давления в аспирационном укрытии получены впервые в области аэродинамики вентиляции. Наибольшее согласование с экспериментальными данными наблюдается при использовании метода RANS. Построены траектории пылевых частиц разной крупности в осредненном во времени поле скоростей, полученном методом RANS. Величина максимального диаметра пылевых частиц, улавливаемых всасывающим патрубком, совпадает с ранее полученным при использовании метода дискретных вихрей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минко В.А., Логачев И.Н., Логачев К.И. и др. Обеспыливающая вентиляция. Т. 1. Белгород: Изд-во БГТУ, 2006.
2. Логачев К.И., Пузанок А.И. Численное моделирование пылевоздушных течений вблизи вращающегося цилиндра отсоса // Изв. вузов. Строительство. 2005. № 2. 63–70.
3. Логачев К.И., Пузанок А.И. Комплекс программ “Спектр” для моделирования пылевоздушных течений вблизи щелевидных всасывающих отверстий // Изв. вузов. Строительство. 2004. № 1. 59–64.
4. Логачев И.Н., Логачев К.И. О прогнозировании дисперсного состава и концентрации грубодисперсных аэрозолей в местных отсосах систем аспирации // Изв. вузов. Строительство. 2002. № 9. 85–90.
5. Логачев К.И., Логачев И.Н., Пузанок А.И. Численное исследование поведения пылевой аэрозоли в аспирационном укрытии // Изв. вузов. Строительство. 2006. № 5. 73–78.
6. Аверкова О.А., Логачев К.И., Зоря В.Ю. Особенности поведения пылевых аэрозолей в аспирационном укрытии стандартной конструкции // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2007. № 11. 34–36.
7. Логачев К.И., Аверкова О.А., Зоря В.Ю. Закономерности изменения дисперсного состава пылевых аэрозолей в аспирационном укрытии // Изв. вузов. Строительство. 2007. № 9. 46–52.
8. 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.
9. Шантала В.Г. Математическое моделирование в прикладных задачах механики двухфазных потоков. Учеб. пособие. Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 1996.
10. Fluent 6.1 Users’ Guide ([http://202.185.100.7/homepage/fluent/html/ug/main\\_pre.htm](http://202.185.100.7/homepage/fluent/html/ug/main_pre.htm)).
11. McDonough J.M. Introductory lectures on turbulence: physics, mathematics and modeling (<http://www.engr.uky.edu/~acfd/lctr-notes634.pdf>).

Поступила в редакцию  
11.09.2009