

СТРОИТЕЛЬСТВО, ПРОМЫШЛЕННОСТЬ, ТРАНСПОРТ

УДК: 533

Черняков Евгений Вадимович**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ПРИТОЧНОГО ВОЗДУХА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ УДАЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ЗАГРЯЗНИТЕЛЯ ИЗ ПРОСТРАНСТВА ЧИСТОГО ПОМЕЩЕНИЯ С УЧЁТОМ ДВИЖЕНИЯ ОПЕРАТОРА**

В статье рассматривается влияние скорости приточного воздуха на эффективность (скорость) удаления частиц загрязнителя из пространства чистого помещения, с учётом неподвижных (рабочий стол) и движущихся (оператор) объектов, находящихся в рабочей зоне данного помещения.

Ключевые слова: вычислительная гидродинамика (CFD), чистые помещения, моделирование воздушных потоков, k-ε модель турбулентности, динамические сетки, удаление частиц загрязнителя.

Cherniakov Evgeny V.**A NUMERICAL INVESTIGATION OF EFFECTS OF THE INLET VELOCITY MAGNITUDE ON THE AIRBORNE CONTAMINANTS REMOVAL FROM A CLEANROOM SPACE TAKING INTO ACCOUNT OPERATOR'S MOVEMENT**

This study deals with the influence of the inlet airflow velocity on the efficiency of the airborne particles removal from a cleanroom area, taking into account moving (operator) and motionless (worktable) objects which are presented in a cleanroom.

Keywords: Computational Fluid Dynamics (CFD), cleanroom, airflow simulation, k-ε model, dynamic mesh, particle removal.

Чистые помещения являются неотъемлемой частью большинства высокотехнологичных производств, в которых поддержание высокого уровня технологической чистоты [1], а также некоторых других параметров, таких как температура, влажность и др. имеют определяющее значение.

Характерной особенностью чистых помещений являются высокие эксплуатационные затраты, сокращение которых является одной из основных задач при проектировании и строительстве чистых помещений. Так как сокращение эксплуатационных затрат позволит существенно повысить рентабельность чистых помещений и, следовательно, даст дополнительный импульс развитию высокотехнологичных производств.

Согласно анализу проведенному специалистами США [2], Японии [3], Тайваня [4] и Европы [5] были выявлены основные потребители энергии в чистых помещениях. Как оказалось, непосредственно на производственные процессы (различные станки и оборудование) расходуется около 40 % всей потребляемой электроэнергии, оставшиеся 60 % практически полностью идут на обеспечение функционирования производства. При этом система ОВК (подготовка и транспортировка воздуха) потребляет – 43 % электроэнергии, другие системы (включая освещение, систему подачи ультра-чистой воды и т. д.) – 17 %.

Основной фактор, оказывающий влияние на количество потребляемой энергии ОВК – это объём подготавливаемого воздуха (кратность воздухообмена – для турбулентно вентилируемых чистых помещений, либо скорость воздушного потока – для помещений с однонаправленным потоком приточного воздуха).

Очевидно, что для того чтобы снизить объём подаваемого воздуха в чистые помещения с однонаправленным потоком воздуха, следует уменьшить скорость приточного воздуха. Одна-

ко данное снижение скорости не должно оказать негативного влияния на эффективность удаления частиц загрязнителя из рабочей зоны чистого помещения.

На данный момент уже проведена серия исследований, касающихся распределения частиц загрязнителя в чистом помещении. Так Suh-Jenq Yang и Wu-Shung Fu провели исследования направленные на изучение влияния движения оператора на удаление частиц загрязнителя в непосредственной близости от рабочего места оператора [6]. Yang-Cheng Shih и др. исследовали влияние движения оператора на распределение воздушных потоков внутри турбулентно вентилируемого помещения, включая анализ распределения скоростей и давлений [7]. М. Н. Saidi и др. исследовали влияние местоположения источника загрязнений на распределение загрязнителя в пространстве чистого помещения [8].

Основная задача данного исследования: продолжить исследования, обозначенные выше, а также расширить их за счет исследования влияния различных скоростей приточного воздуха на распределение частиц загрязнителя и эффективность их удаления с учетом находящихся в рабочей зоне чистого помещения подвижных и неподвижных объектов.

Для этой цели автором была разработана компьютерная модель чистого помещения, в которой присутствуют как стационарные, так и подвижные объекты.

Для дискретизации расчетных областей со сложной геометрической топологией был использован программный комплекс Ansys ICEM-CFD [9, 10], для более простой геометрии использовался Ansys GAMBIT [11]. Задание граничных условий и начального распределения, а также расчет и обработка полученных результатов велись в программном комплексе Ansys FLUENT [12, 13]. Визуализация осуществлялась в программе Tecplot360.

Размеры предложенной модели ($3 \times 6 \times 2,8$ м) соответствуют размерам чистых помещений, применяемым в исследовательских центрах и учебных заведениях (рис. 1). Рассматриваемая модель представляет собой чистое помещение с однонаправленным воздушным потоком, в котором приток воздуха осуществляется через высокоэффективные потолочные фильтры (фильтры покрывают 100% площади потолка), а удаление воздуха – через перфорированный пол помещения. Согласно поставленной задаче, оператор движется с постоянной скоростью (1 м/с) вдоль оси Z. Расстояние, пройденное оператором, составляет 4 м.

При решении поставленной задачи была использована неструктурированная сеточная технология. В результате наложения сеток на модель, было получено 264 559 тетраэдральных и 286 276 гексаэдральных расчетных ячеек.

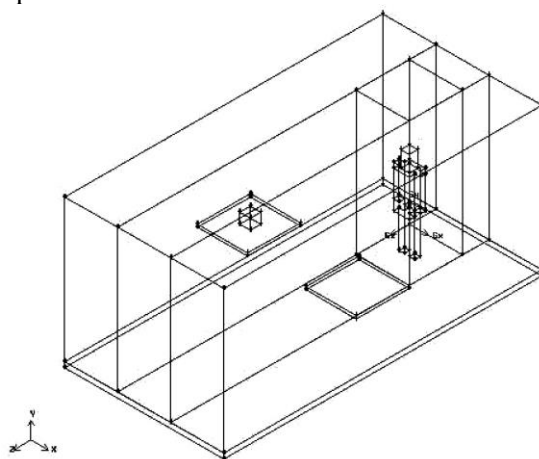


Рис. 1. Геометрическая модель чистого помещения (общий вид 3D) в программном комплексе ICEM-CFD

При моделировании воздушных потоков в рамках данного исследования, автором был выбран подход, основанный на решении уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу (RANS). Для «замыкания» уравнений RANS в данной работе была выбрана модель турбулентности, в которой используются два транспортных дифференциальных уравнения для расчета кинетической энергии k и турбулентной диссипации ϵ (модель $k-\epsilon$). Данная модель отличается

надежностью, достаточной точностью для широкого спектра турбулентных течений и, в то же время, она достаточно экономична к вычислительным ресурсам [14].

Уравнения для k и ε имеют следующий вид:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (1)$$

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

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u_i' u_j'} = \rho \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (4)$$

где k – турбулентная кинетическая энергия, $\text{м}^2/\text{с}^2$;

ε – скорость диссипации турбулентной кинетической энергии, $\text{м}^2/\text{с}^2$;

μ, μ_t – коэффициенты кинематической молекулярной и турбулентной вязкости, $\text{кг}/\text{м} \cdot \text{с}$;

τ_{ij} – компоненты тензора рейнольдсовых напряжений, $\text{м}^2/\text{с}^2$;

δ_{ij} – символ Кронекера ($i = j \rightarrow \delta_{ij} = 1$; $i \neq j \rightarrow \delta_{ij} = 0$);

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ – значения числа Прандтля для k и ε , соответственно;

$c_{\varepsilon 1}, c_{\varepsilon 2}, C_\mu$ – модельные константы.

$$c_{\varepsilon 1} = 1.44; c_{\varepsilon 2} = 1.92; C_\mu = 0.09; \sigma_k = 1.0; \sigma_\varepsilon = 1.3$$

При определении значений k и ε для поверхности, через которую осуществляется подача воздуха в пространство чистого помещения была применена теория длины смешения турбулентных течений (Mixing Length Model) [15].

В качестве основного алгоритма сегрегации был выбран – SIMPLE [16]. Данный алгоритм использует связь скорости и корректировок давлений для обеспечения сохранения массы, а также, чтобы получить поля давлений.

В качестве граничных условий на границе вязкой жидкости и твердого тела были выбраны «no-slip boundary conditions».

Для расчета нестационарного режима следует использовать динамическую сетку, а также UDF (User-Defined Function) [17].

Для данного расчета автором была составлена функция, позволяющая описать характер движения манекена вдоль одной из стен чистого помещения. В пространство модели было произведено 5 введений индикаторных частиц (по 5 частиц сферической формы диаметром 0,3 мкм на каждую из 5-ти плоскостей источника загрязнений в течение первых пяти секунд моделирования). Таким образом, в сумме в пространство чистого помещения было введено 125 частиц.

В качестве физических моделей, используемых при анализе внесенных частиц, были выбраны: модель подъемной силы Саффмена и модель эрозии/аккумуляции [18, 19].

В процессе моделирования было проанализировано девять случаев, отличающихся скоростью приточного воздуха (при скоростях воздушного потока 0,01 м/с; 0,1 м/с; 0,2 м/с; 0,3 м/с; 0,4 м/с; 0,5 м/с; 0,6 м/с; 0,8 м/с; 1,0 м/с).

В результате проведения моделирования были установлены зависимости между скоростью приточного воздуха и эффективностью удаления частиц из рабочей зоны чистого помещения с учетом движения оператора (рис. 2), а также проведен анализ возможности переноса частиц из одной зоны помещения в другую.

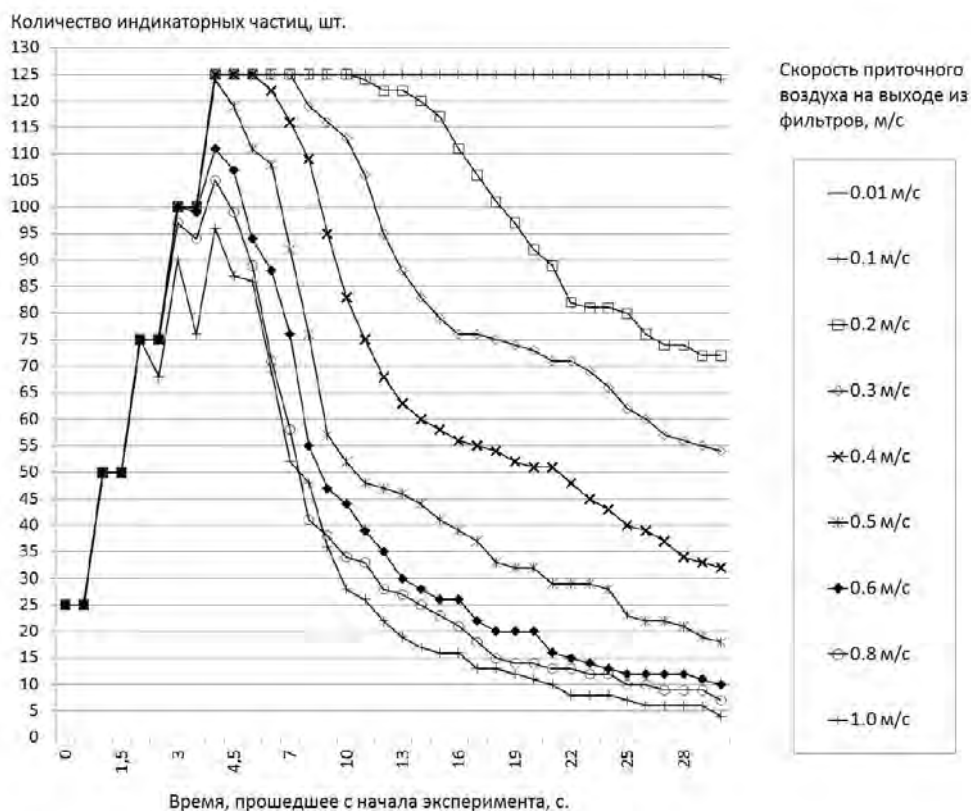


Рис. 2. Суммарная эффективность удаления частиц загрязнителя

При анализе рис. 2 можно сделать вывод, что скорость приточного воздуха напрямую влияет на скорость удаления частиц из чистой зоны. Однако были выявлены некоторые особенности:

скорости в диапазоне от 0,01 м/с до 0,1 м/с недостаточно для удаления частиц из рабочей зоны в течение всего времени проведения моделирования (30 с);

в диапазоне скоростей 0,6 м/с – 1,0 м/с эффективность удаления частиц остается практически неизменной, то есть, скорость приточного потока свыше 0,5 м/с – 0,6 м/с является нерациональной;

вне зависимости от присутствия движущегося объекта (оператора), а также скорости приточного воздуха в некоторых зонах чистого помещения могут образовываться зоны локальной циркуляции, в которых может накапливаться значительное количество частиц (рис. 3). Избежать данного эффекта возможно только правильной планировкой помещения (отсутствие пустот под поверхностью стола или другой горизонтальной поверхности);

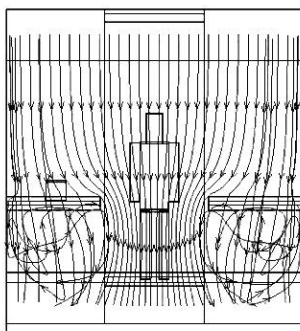


Рис. 3. Направление потоков воздуха в чистом помещении

Итак, в результате проведенного исследования, становится очевидным, что наиболее критичное изменение эффективности (скорости) удаления частиц загрязнителя наблюдается в диапазоне скоростей 0,2–0,5 м/с. В свою очередь, скорость воздушного потока 0,01–0,1 м/с не способна удалить частицы загрязнителя в течение времени моделирования (30 сек). В диапазоне скоростей 0,6–1,0 м/с эффективность удаления частиц остается практически неизменной.

Зачастую скорость приточного воздуха равная 0,3 м/с является достаточной для эффективного удаления частиц загрязнителя. Таким образом существует возможность экономии эксплуатационных затрат не только для вновь проектируемых чистых помещений, но и для существующих (за счет снижения скорости приточного воздуха).

Также следует отметить, что согласно проведенному моделированию движение оператора, безусловно, влияет на воздушный поток в чистом помещении, однако не оказывает значительного влияния на удаление частиц загрязнителя из рассматриваемой зоны в случае, когда источник загрязнения находится в установленной условием точке. Для более полного понимания данного явления в дальнейшем следует провести аналогичные исследования с различным положением источника загрязнений.

Литература

1. Чистые помещения / под ред. А. Е. Федотова. 2-е издание, переработанное и дополненное, М.: АСИНКОМ, 2003. 576 с.
2. Randy Schrecengost, Phil Naughton: Cleanroom energy optimization methods. Proceedings of the fourteenth symposium on improving building systems in hot and humid climates, Richardson, TX, May 17–20, 2004.
3. Mikio Matsuki, Norio Tanaka: Energy saving system for air conditioning of clean room for semiconductor factory (Estimation of FMU System). Oki Technical Review, 1998, P. 40–43.
4. S. C. Hu, Y. K. Chuah, Power consumption for semiconductor FABs in Taiwan, Energy. 28 (8) 2003. P. 895–907.
5. W. Whyte: Cleanroom design – 2nd ed., John Wiley & Sons, Baffins Lane, Chichester, West Sussex, England, 1999. 384 p.
6. Suh-Jenq Yang, Wu-Shung Fu, A numerical investigation of effects of a moving operator on airflow patterns in a cleanroom, Building and Environment 37, 2002. P. 659–664.
7. Yang-Cheng Shih, Cheng-Chi Chiu, Oscar Wang. Dynamic airflow simulation within an isolation room, Buildings and Environment 42, 2007. P. 3194–3209.
8. M. H. Saidi, B. Sajadi, G.R. Molaeimanesh. The effect of source motion on contaminant distribution in the cleanroom, Energy and Buildings 43, 2011. P. 966–970.
9. Ansys ICEM-CFD 11.0 Tutorial Manual, USA, 2007.
10. Ansys ICEM-CFD 12.0 User Manual, USA, 2009.
11. Ansys GAMBIT 2.2 Tutorial Guide, USA, 2004.
12. Ansys FLUENT 12.1 Documentation, USA, 2009.
13. FLUENT6.2 User's Guide, USA, 2005.
14. Юн А. А., Крылов Б. А.. Расчет и моделирование турбулентных течений с теплообменом, смешением, химическими реакциями и двухфазных течений в программном комплексе Fastest-3D: учебное пособие. М.: Изд-во МАИ, 2007. 116 с.
15. Rodi W. Turbulence models and their applications – a state of the art review. Delft, The Netherlands: IAHR, 1980.
16. Patankar S. V. Numerical heat transfer and fluid flow. Washington, DC: Hemisphere Publishing Corporation, 1980 [Chapter 6].
17. FLUENT 6.3 UDF Manual, USA, 2006.
18. A. Li and G. Ahmadi. Dispersion and Deposition of Spherical Particles from Point Sources in a Turbulent Channel Flow. Aerosol Science and Technology. 16. 1992. P. 209–226.
18. Saffman P. G. The Lift on a Small Sphere in a Slow Shear Flow. J.Fluid Mech 22. 1965. P. 385–400.