

УДК: 533

Черняков Евгений Вадимович

ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДСТВАМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ (CFD) ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ПРИТОЧНОГО ВОЗДУХА НА ВРЕМЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ (СТАБИЛИЗАЦИИ) ОДНОНАПРАВЛЕННОГО ВОЗДУШНОГО ПОТОКА ВСЛЕДСТВИЕ НАРУШЕНИЯ, ВЫЗВАННОГО ДВИЖЕНИЕМ ОПЕРАТОРА В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ ЧИСТОГО ПОМЕЩЕНИЯ

В данной статье рассмотрено влияние неподвижных и движущихся объектов на однонаправленный воздушный поток в чистом помещении (с учетом изменения скорости потока на входе в чистое помещение в диапазоне от 0,1 до 1,0 м/с).

Ключевые слова: вычислительная гидродинамика, чистые помещения, время стабилизации воздушного потока, моделирование воздушных потоков, динамические сетки, движущийся оператор.

Cherniakov Evgeny V.

A NUMERICAL INVESTIGATION OF EFFECTS OF THE INLET VELOCITY MAGNITUDE ON THE RECOVERY (STABILIZATION) TIME OF THE UNIDIRECTIONAL AIRFLOW, WHICH WAS DISTURBED BY THE OPERATOR MOVEMENT IN A CRITICAL ZONE

This study deals with the influence of static and dynamic objects on the airflow (generated by a unidirectional air supply with different velocities of the air, from 0.1 to 1.0 m/s) inside a cleanroom space.

Key words: Computational Fluid Dynamics (CFD), cleanroom, time of the airflow recovery (stabilization), airflow simulation, dynamic mesh, moving operator.

Согласно анализу, проведенному экспертом в области чистых помещений Ллойдом Кроствей-том, капитальные затраты при строительстве такого рода помещения для нужд полупроводниковой промышленности составляют в среднем 1 800–4 000 USD на каждый квадратный фут (1 фут = 0,3 м) площади. В то же время эксплуатационные затраты, соответствующие подобному чистому помещению, нередко составляют 1 000 000 USD в год. В результате суммарные эксплуатационные затраты чистого помещения за время его эксплуатации превышают капитальные затраты в несколько раз.

Основной фактор, оказывающий влияние на количество потребляемой энергии ОВК, – это объем подготавливаемого воздуха (кратность воздухообмена – для турбулентно вентилируемых чистых помещений; скорость воздушного потока – для помещений с однонаправленным потоком приточного воздуха), т. к. при возрастании количества подаваемого воздуха растет нагрузка на систему охлаждения и нагрева приточного воздуха, а также увеличивается мощность вентиляторов. Таким образом, даже незначительное снижение объема подаваемого воздуха позволит существенно повысить рентабельность производств, в которых используются чистые помещения.

Как правило, в случае когда в пространстве чистого помещения отсутствует движение и, как следствие, возмущения воздуха, которые приводят к нарушению однонаправленного потока, для поддержания требуемого класса чистоты достаточно скорости воздуха 0,1–0,2 м/с. Основная сложность возникает тогда, когда необходимо обеспечить требуемый класс чистоты в действующих помещениях, в пространстве которых можно наблюдать различные движения, совершаемые персоналом и оборудованием. В результате этих движений возникают разнообразные воздушные завихрения, которые могут служить «транспортным тоннелем» для микрозагрязнителей, взвешенных в воздухе. Именно по этой причине при тестировании чистого помещения особое внимание уделяется стадии «operational» [5], т. е. когда система чистых помещений функционирует установленным образом, с установленной численностью персонала.

На данный момент уже было проведено несколько исследований в данном направлении.

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 (изолятора), включая анализ рас-

пределения скоростей и давлений [7]. М.Н. Saidi и др. исследовали влияние местоположения источника загрязнений на распределение загрязнителя в пространстве чистого помещения [8].

Мы поставили перед собой цель проанализировать влияние скорости воздушного потока на входе в чистое помещение на время восстановления (стабилизации) этого потока, после возмущения, вызванного движущимся объектом (оператором) вдоль одной из осей помещения.

Полученные результаты могут оказаться полезными при составлении стандартов и других норм, касающихся проектирования чистых помещений, в особенности выбора скорости приточного воздуха.

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.

Для решения поставленных задач была создана модель чистого помещения с размерами 3 x 6 x 2,7 м (см. рис. 1). Размеры предложенной модели соответствуют размерам чистых помещений, применяемых в исследовательских центрах и учебных заведениях. 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.

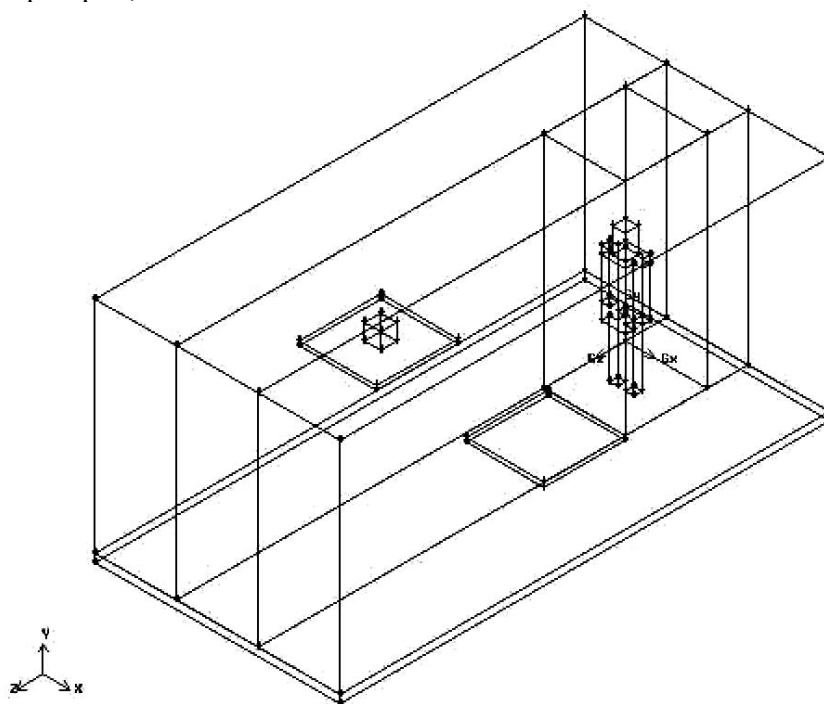


Рис. 1. Геометрическая модель чистого помещения (общий вид 3D) в программном комплексе ICEM-CFD

При решении поставленной задачи была использована неструктурированная сеточная технология. Размер пристеночной ячейки – не более 40 мм. В результате наложения сеток на модель, было получено 264 559 тетраэдральных и 28 6276 гексаэдральных расчетных ячеек.

Проведя ряд преобразований в отношении определяющих уравнений, а именно уравнения неразрывности или сохранения массы и уравнения изменения количества движения, можно получить уравнение движения в форме Навье-Стокса. Для несжимаемых жидкостей и при постоянной вязкости уравнение Навье-Стокса записывается в виде:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} + g_i \quad (1)$$

где u_i – компонента скорости, м/с; t – время, с; x_i – декартовы координаты, м; ρ – плотность, кг/м³; p – статическое давление, Па; g_i – ускорение свободного падения, м/с².

Для решения уравнения (1) применяется стандартная k - ε модель турбулентности. Данная модель отличается надежностью, достаточной точностью для широкого спектра турбулентных течений и в то же время она достаточно экономична к вычислительным ресурсам.

Уравнения для k и ε имеют следующий вид:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u_i u_j} = \rho \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (5)$$

где k – турбулентная кинетическая энергия, м²/с²; ε – скорость диссипации турбулентной кинетической энергии, м²/с²; μ , μ_t – коэффициенты кинематической молекулярной и турбулентной вязкости, кг/м·с; τ_{ij} – компоненты тензора рейнольдсовых напряжений, м²/с²; δ_{ij} – символ Кронекера ($i = j \rightarrow \delta_{ij} = 1$; $i \neq j \rightarrow \delta_{ij} = 0$); σ_k , σ_ε – значения числа Прандтля для k и ε , соответственно; $c_{\varepsilon 1}$, $c_{\varepsilon 2}$, C_μ – модельные константы.

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

Для определения значений k и ε для поверхности типа INLET была применена теория длины смешения турбулентных течений (Mixing Length Model).

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 была использована динамическая сетка, а также специально написанная UDF [17], позволяющая описать характер движения манекена вдоль одной из стен чистого помещения.

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). Для каждого случая было определено время стабилизации воздушного потока.

Для отображения воздушных потоков были выбраны две индикаторные плоскости (А и В), которые пересекают пространство чистого помещения вдоль оси Z и X, соответственно.

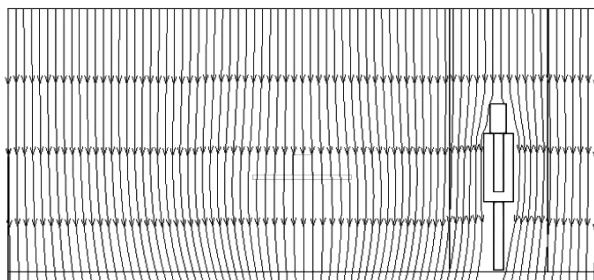


Рис. 2.1.

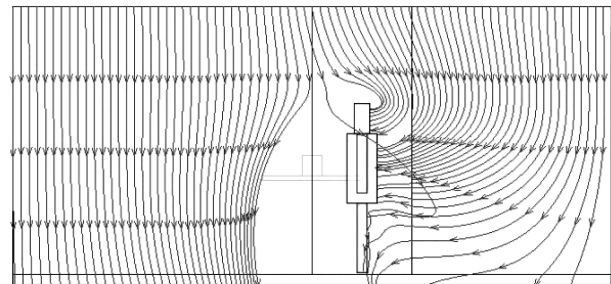


Рис. 2.2.

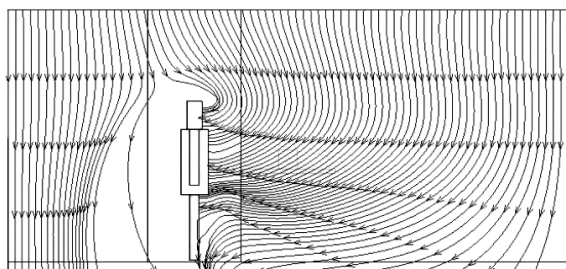


Рис. 2.3.

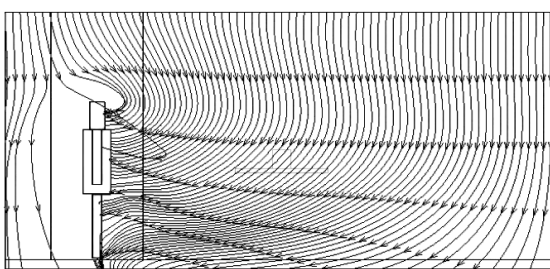


Рис. 2.4.

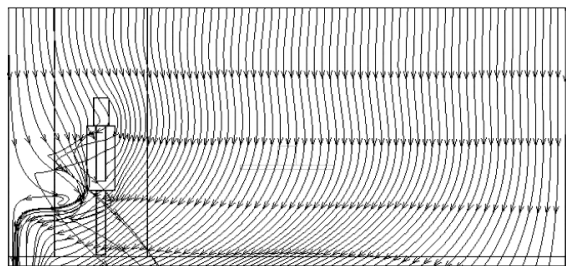


Рис. 2.5.

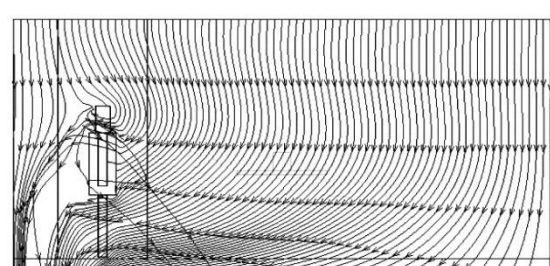


Рис. 2.6.

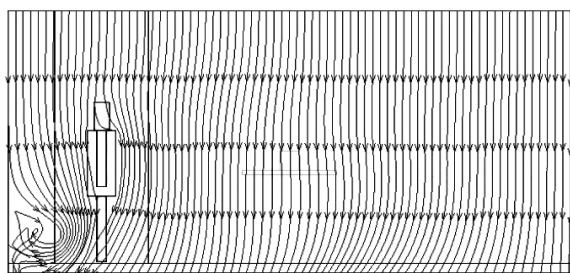


Рис. 2.7.

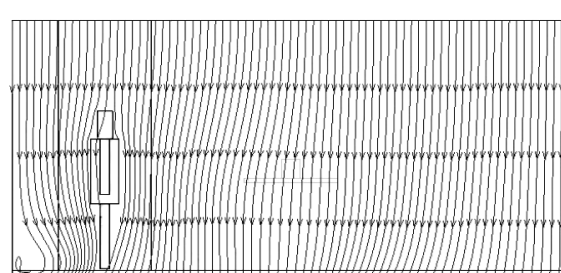


Рис. 2.8.

Рис. 2.1–2.8. Линии потока воздуха в плоскости индикаторной поверхности В во время движения манекена/оператора в момент времени 0 с; 1,0 с; 2,0 с; 3,0 с; 4,0 с; 6,0 с; 8,0 с; 12,0 с, соответственно (скорость потока воздуха 0,3 м/с)

Результаты, отражающие зависимость времени стабилизации воздушного потока от скорости воздуха на входе в чистое помещение, представлены на рис. 3.

Проведенные исследования позволяют сделать некоторые выводы.

1. Движение оператора вызывает существенные нарушения воздушного потока в чистом помещении, следовательно, оно оказывает существенное влияние на скорость удаления частиц загрязнителя из чистой зоны;

2. Скорость приточного воздуха оказывает прямое влияние на время релаксации (восстановления) воздушного потока после его нарушения, вызванного движением оператора.

3. При скорости воздушного потока 0,5 м/с и выше разница во времени стабилизации воздушного потока незначительна (см. рис. 3);

4. В процессе движения оператора в чистом помещении формируются различные завихрения, которые на практике могут служить «транспортными тоннелями» для загрязнителей, представленных в воздухе чистого помещения. Тем самым, чем дольше время стабилизации потока воздуха, тем выше вероятность распространения загрязнителя по значительной площади чистого помещения;

5. Разница во времени стабилизации воздушного потока имеет тенденцию уменьшаться с возрастанием скорости приточного воздуха. Так например, разница во времени стабилизации воздушного потока в случаях, когда скорость приточного воздуха меняется от 0,1 м/с до 0,2 м/с, значительно больше, чем разница во времени стабилизации воздушного потока для скоростей приточного воздуха 0,3 м/с и 0,4 м/с (примерно 4,5 сек и 1 сек для индикаторной поверхности А, и 10,5 сек и 2 сек для индикаторной поверхности В, соответственно).

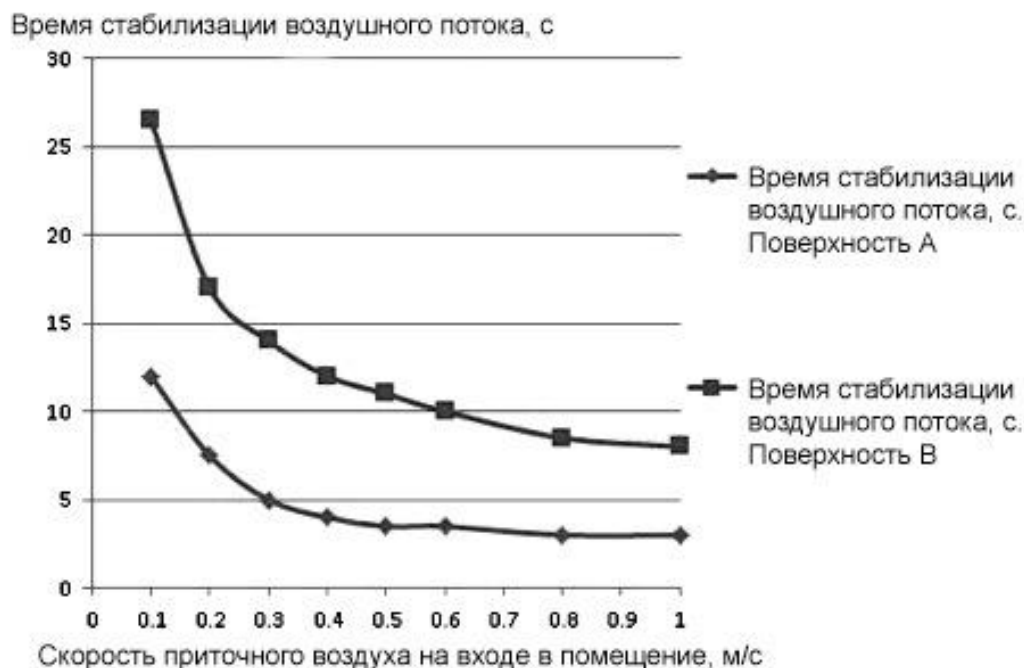


Рис. 3. Зависимость времени стабилизации воздушного потока t от скорости воздуха на входе в чистое помещение v

Литература

1. Randy Schrecengost, Phil Naughton: Cleanroom energy optimization methods. Proceedings of the fourteenth symposium on improving building systems in hot and humid climates, Richardson, TX, 2004. P. 17–20.
2. 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.
3. S.C. Hu, Y.K. Chuah: Power consumption for semiconductor FABs in Taiwan, Energy 28 (8), 2003. P. 895–907.
4. W. Whyte: Cleanroom design – 2nd ed., John Wiley & Sons, Baffins Lane, Chichester, West Sussex, England. 1999. 384 p.
5. ГОСТ ИСО 14644-1 Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 1. Классификация чистоты воздуха. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002.
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. FLUENT 6.2 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. Launder B. E., Spalding D. B.. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. Academic Press, London, England, 1972. 169 p.
16. Patankar S. V. Numerical heat transfer and fluid flow. Washington, DC: Hemisphere Publishing Corporation, 1980. 197 p.
17. FLUENT 6.3 UDF Manual, USA, 2006.