

1. Введение

2. Математическое моделирование в проблеме чистых комнат

3. Пакет прикладных программ CRAG

4. Примеры использования ППП CRAG при проектировании CR

4.1. Аттестация CR ОЗОН-1 (микроэлектроника)

4.2. Экспертиза проекта CR ОЗОН-2 (микроэлектроника)

4.3. Эскизное проектирование (фармацевтика)

4.4. Экономичный подход оценки температурных факторов в CR

4.5. Оптимизация формы потолочных светильников для CR

5. Заключение

Благодарности

Литература

Математическое моделирование является одним из важнейших инструментов при проектировании чистых комнат (CR). В статье приводится краткий обзор работ по применению математического моделирования для решения ряда задач в проблеме CR. Показаны возможности использования пакета прикладных программ CRAG на различных этапах создания реальных CR (аттестация помещения, экспертиза проекта, эскизное проектирование) и их элементов (выбор оптимальной формы потолочных светильников).

1. Введение

В последние годы в связи с возрастающей ролью высокотехнологичных процессов и производств (микроэлектроника, фармацевтика, медицина, биотехнология, химическая и пищевая промышленность и т.д.) все большее внимание уделяется "климатическим" условиям в помещении или его части, где осуществляется этот процесс. Скорость воздушных потоков и их направленность, температура среды и ее градиенты, влажность, наличие в среде электрически нейтральных или заряженных частиц или микроорганизмов и их допустимые размеры - далеко не полный перечень тех факторов, которые могут существенно повлиять на качество производимой продукции. При этом часто возникает необходимость учитывать тепло- и массовыделение оборудования и персонала, а также подвижность элементов оборудования, роботов, операторов.

Помещения с особыми "климатическими" условиями в зарубежной литературе получили название "чистых комнат" (clean rooms - CR), в России, наряду с этим, часто используется термин "чистые производственные помещения" (ЧПП). В высоко развитых странах за последние 25 лет создана самостоятельная отрасль - индустрия CR, куда входит не только проектирование и производство CR, но и такие необходимые атрибуты как материалы, фильтры, лакокрасочные покрытия и герметики, спецодежда, кремы для персонала и т.д. Разрабатываются специальные технологии производства и монтажа CR и даже инструкции по поведению в CR для операторов и обслуживающего персонала.

Для классификации помещений по степени чистоты (число частиц определенного размера в единице объема) существуют определенные стандарты. С целью координации деятельности и более оперативного обмена информацией во многих странах созданы ассоциации технологов, инженеров и ученых. Эти ассоциации входят в международную конфедерацию обществ по управлению микрозагрязнениями (ICCCS). Российская ассоциация инженеров по контролю микрозагрязнений (АСИНКОМ), образованная в 1990 году, с 1992 года является членом ICCCS.

Одной из важнейших целей строительства CR является обеспечение гарантий поддержания требуемых "климатических" условий в помещениях и/или чистых рабочих зонах. Предварительная, достаточно

точная и дешевая оценка воздушных потоков, тепло- и массопереноса в CR может быть получена с помощью математического моделирования (ММ) происходящих там процессов. Многие страны, следуя этому пути, разработали и используют специальные правила производства CR. Например, Total Quality Management (TQM) System в США [1]. Автоматизация проектирования - одна из важнейших составных частей этой системы. Математическое моделирование воздухо-, тепло- и массопереноса в CR является частью автоматизированного проектирования и дает возможность увидеть на экране монитора компьютера воздушные и тепловые потоки, перенос микрочастиц еще до начала проектирования. Это позволяет проектировщику выбрать оптимальное решение, избежать ошибок, ускорить процесс проектирования, повысить качество и уменьшить стоимость работ по проектированию. Это особенно важно при перепроектировании, когда типовые решения неприемлемы. Математическое моделирование может быть также с успехом применено при оценке (экспертизе) проектов, при сертификации и аттестации CR, для обучения и тренировки персонала.

2. Математическое моделирование в проблеме чистых комнат

Чистые комнаты - это трехмерные объекты со сложной геометрией, распределенными системами подвода и отвода воздуха через вентиляционные отверстия или перфорированные потолок и фальшпол, размещенным оборудованием сложной формы, движущимися роботами и персоналом, с источниками частиц различных размеров и различными законами их поведения. Воздушные, тепловые потоки и движение частиц являются трехмерными и турбулентными с точки зрения газодинамики. Для математического моделирования таких процессов необходима разработка адекватных математических моделей, которые правильно описывают механизмы переноса. Только правильно описывая физические процессы можно надеяться на получение не только качественных, но и количественных результатов. Для решения соответствующих математических задач (уравнения с начальными и граничными условиями) необходимо конструировать эффективные численные алгоритмы, которые дадут возможность получать количественные результаты (за разумное время с практически приемлемой точностью) в виде таблиц, кривых или картин потока. Написанные с использованием таких моделей и методов компьютерные программы, или пакеты прикладных программ, должны тестироваться на хорошо известных и хорошо изученных задачах, результаты их работы должны сравниваться с расчетами других авторов, с данными физических экспериментов и натуральных измерений.

Развитие математических моделей в проблеме CR ведется по двум основным направлениям. Первое - исследование различных моделей турбулентности и численных методов. Специально для этих целей ставятся физические и натурные (используются реальные чистые помещения) эксперименты. Например, в университете штата Миннесота (США) специально построенная чистая комната туннельного типа используется как для проверки измерительной аппаратуры, так и для тестирования математических моделей. Экспериментальная чистая комната в НПО НИКИМТ (Россия, Москва) создавалась для тех же целей. В рамках ежегодной технической конференции американского института (Institute of Environmental Science, San-Diego, USA) [2] в 1991 г. работала специальная рабочая группа, на которой сравнивались численные результаты, полученные при решении одной и той же задачи авторами из различных стран: США - 3, Япония - 2, Германия - 1. Были рассмотрены ламинарные и турбулентные (типа k-ε) модели потоков с Эйлеровыми, Лагранжевыми, Лагранжево-статистическими (Монте-Карло) моделями переноса частиц. Сравнение показало следующее: поля скорости, полученные с помощью различных подходов находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными; использование k-ε модели турбулентности даже в случае неработающего оборудования требует дальнейших исследований. Необходимо проводить исследования как двумерных [3], так и трехмерных [4] моделей потоков. Необходимо проводить изучение применимости различных математических моделей (прямое численное моделирование, k-ε и LES - Large Eddy Simulation) в проблеме CR. Комплексные лабораторные и численные исследования проводятся в Институте промышленных наук (Institute of Industrial Science) Токийского университета под научным руководством профессора Т. Мураками [4]. Второе направление - это решение реальных двух и трехмерных задач. Результаты, полученные в рамках этого направления, требуют специального анализа. Необходимо оценивать качество используемых математических моделей и методов. Для случаев двумерных течений (возможны в комнатах туннельного или линейного типа) выполнено глобальное математическое моделирование движения воздуха, переноса

тепла и частиц [5-9], исследованы поведения чистых рабочих зон: осаждение субмикронных частиц на поверхность в ламинарном и турбулентном потоках [10]; перенос и осаждение субмикронных частиц в CVD-камере [11]; численное моделирование переноса и осаждения частиц, возникающих от износа поверхности, в дисководах компьютеров [12]; течения около конструктивных элементов [13-14], воздушных экранов [15,16]. Проведена оптимизация трехмерного воздушного потока в чистой комнате [17]. Математическое моделирование использовалось для проектирования CR в фармацевтической промышленности [18,19], операционных комнат [20], исследования распределения потоков воздуха в комнате линейного типа [21], исследования вертикального теплового потока в комнате вертикально-ламинарного типа [22] и при исследовании систем пожаротушения [23].

Следует также отметить, что на проводимых ICCCS каждые два года международных симпозиумах, посвященных проблеме CR, отмечается тенденция к росту числа сообщений, связанных с математическим моделированием процессов, происходящих в CR. Более того, некоторым из этих симпозиумов предшествуют краткие курсы по применению математического моделирования в проблеме CR, проводимые крупными специалистами в этой области, а на 13-м симпозиуме ICCCS (Нидерланды, 1996) была организована отдельная секция по применению математического моделирования в проблеме CR. Аналогичная секция работает и в рамках ежегодно проводимых российских конференций АСИНКОМ, членом Совета которой, отвечающим за математическое моделирование, является автор этой статьи.

3. Пакет прикладных программ CRAG

Сотрудники сектора вычислительной гидродинамики Института автоматизации проектирования Российской академии наук имеют более чем двадцатилетний опыт в области разработки математических моделей и методов для решения задач аэрогидродинамики для различных приложений. За это время проведены исследования внутренних и внешних, стационарных и нестационарных, двух- и трехмерных течений однородной и неоднородной по плотности жидкости и течений со свободной поверхностью [24-33].

В 1989 году группа начала работы по математическому моделированию воздухо-, тепло- и массопереноса в CR. Был разработан пакет прикладных программ (ППП) CRAG (Clean Room Aerodynamic Guide). Этот пакет основан на решении трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса с учетом переноса тепла и динамики концентрации микрочастиц. Для решения возникающих задач используется один из разработанных вариантов разностного метода расщепления по физическим факторам МЕРАНЖ [24,29,31,34]. Пакет программ CRAG реализован на различных платформах от PC, PC + транспьютерная плата до 128-процессорной транспьютерной системы PARAM 8000 [35,36]. В настоящее время имеются версии пакета, реализованные на многопроцессорном комплексе PARAM 9000 (на процессорах SuperSparc) [37] и PARAM Open Frame (на процессорах ULTRA Sparc). Он может быть легко адаптирован для использования и на других вычислительных платформах. В зависимости от сложности решаемой задачи и используемой вычислительной техники время решения может колебаться от нескольких секунд до нескольких десятков часов. На входе пакета задаются следующие параметры: размеры CR; размеры и положение оборудования; положение и проницаемость фальшпола; положение вентиляционных отверстий и скорость воздуха в них; положение и мощность источников загрязнения и тепла; параметры движущихся объектов; параметры неоднородности разностной сетки; число процессоров при расчетах на многопроцессорной системе. На выходе вы можете получить: аэродинамические характеристики CR (поля скорости, давления, температуры, концентрации загрязнения); пользователю доступны как числовые значения всех параметров, так и различные формы графического представления - графики вдоль различных осей координат, двумерные поля изолиний, либо двумерные цветные карты пространственного распределения; на экран может быть выведен вид трехмерной сцены комнаты с расположенным в ней оборудованием [35-42]. В настоящее время этот пакет модифицируется для решения гидродинамических задач из других областей таких как аэродинамика зданий, аэродинамика автомобиля (внутренняя и внешняя), вентиляция промышленных объектов и т.д.

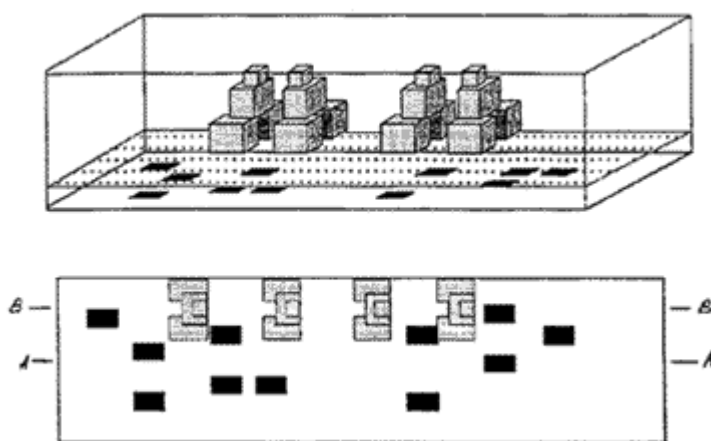


Рисунок 1.

4. Примеры использования ППП CRAG при проектировании CR.

Здесь мы не будем останавливаться на конкретных математических постановках задач и методах их решения, а обратим внимание на применение ППП CRAG на трех различных стадиях создания реальных CR (аттестация и сертификация готового объекта ОЗОН-1 - комнаты фотолитографии для производства изделий микроэлектроники на заводе "Микрон", экспертиза проекта CR ОЗОН-2 (микроэлектроника) и эскизное проектирование весовой комнаты для фармацевтической промышленности). Будет показана возможность использования экономичного (с точки зрения объема вычислений и времени необходимого для них) подхода в случае незначительных изменений температурных факторов, различных объектов, находящихся в CR и способ построения оптимальной формы потолочных светильников.

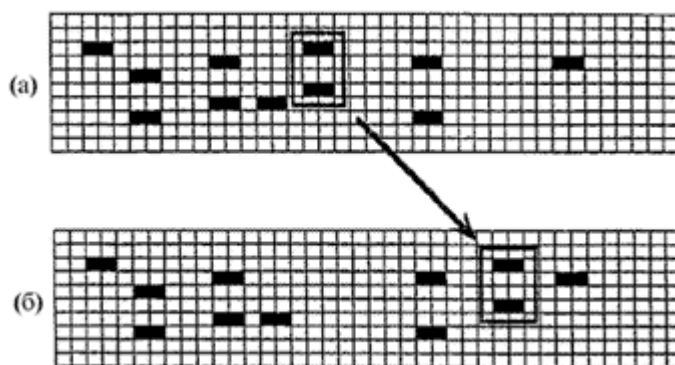


Рисунок 2.

4.1. Аттестация CR ОЗОН-1 (микроэлектроника).

В первом примере рассмотрим смонтированную на заводе "Микрон" комнату фотолитографии ОЗОН-1 (см. рис.1). В данном случае технологическое оборудование расположено на фальшполе, степень перфорации которого 0.26. Высота фальшпола - 0.6 м. Для вентиляции воздух подается в комнату через потолок со скоростью 0.45 м/с и отводится через 11 отверстий в полу, исходное положение которых показано на рис.2а. Известно, что в случае CR, предназначенных для производства изделий микроэлектроники, отклонения воздушного потока от вертикального направления не должны превышать 14° . Однако натурные измерения и последующие расчеты с использованием ППП CRAG показали, что в некоторых частях данной CR отклонения воздушного потока существенно превышали допустимые нормы. Течение в одном из вертикальных сечений показано на рис.3а. С учетом максимальной технологичности и минимума конструктивных изменений после серии расчетов было предложено изменить положение двух отводных отверстий в полу (см. рис.2б). При этом требуемая "вертикальность"

воздушного потока была достигнута, что показано для того же вертикального сечения на рис.3б. Предложенные конструктивные изменения были реализованы и объект был принят комиссией для эксплуатации.

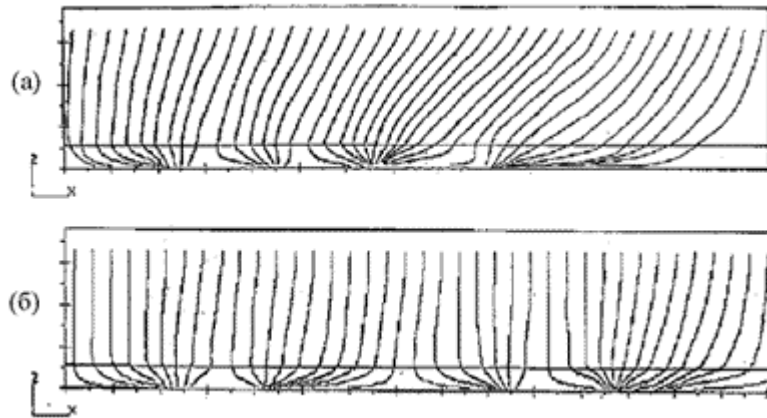


Рисунок 3.

4.2. Экспертиза проекта CR ОЗОН-2 (микроэлектроника).

Во втором примере демонстрируется применение ППП CRAG для экспертизы проекта CR ОЗОН-2, также предназначенной для производства изделий микроэлектроника. В этом случае комната представляет собой расположенные по обе стороны коридора секции с технологическим оборудованием, размещенным непосредственно на полу (см. рис. 4). Фальшпол имеет структуру как и в первом примере. В проекте предлагалось использовать три показанных на рис. 5а отводных отверстия. Расчеты, проведенные для данной конфигурации, показали, что воздушный поток в этом случае также имел недопустимые отклонения от вертикали, более того в одном из концов коридора располагался вихрь, поднимающий воздух из-под фальшпола, что отчетливо видно на приведенном на рис.6а вертикальном сечении, проходящем через коридор. В качестве рекомендации на основании расчетов было предложено использовать пять отводных отверстий (см. рис.5б), что существенно улучшило картину течения (рис. 6б).

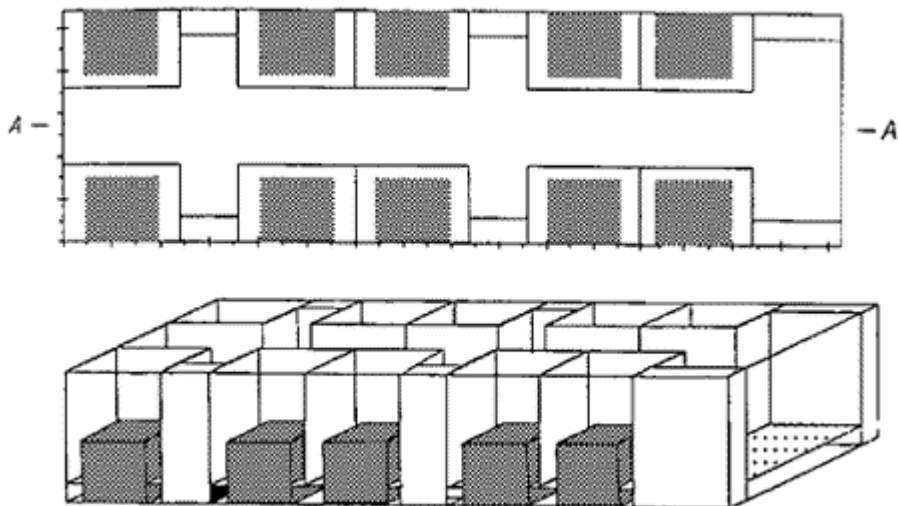


Рисунок 4.

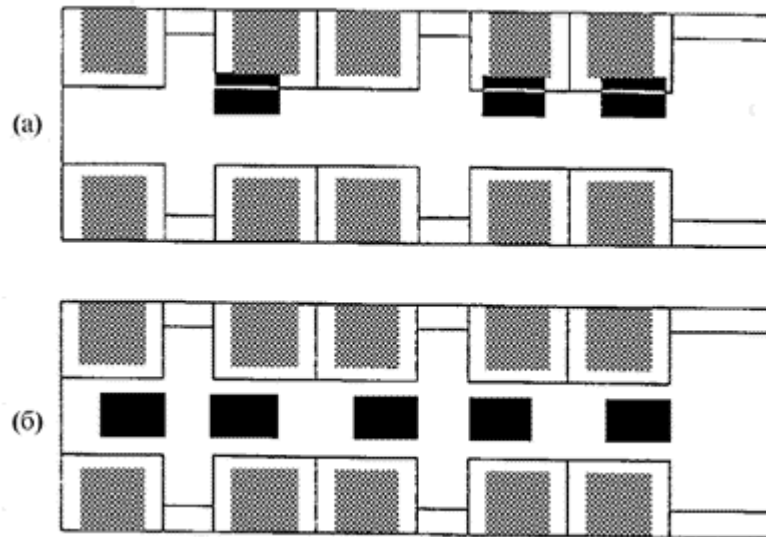


Рисунок 5.

4.3. Эскизное проектирование (фармацевтика).

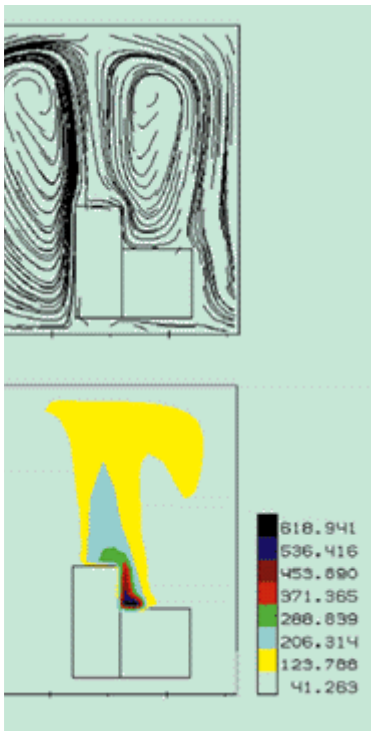


Рисунок 8.

В следующем примере показано применение ППП CRAG на этапе эскизного проектирования, т.е. когда проектировщик, прежде чем приступить к проектированию, хочет получить ответы на некоторые интересующие его вопросы и отобрать оптимальные решения. Рассмотрим это на примере проектирования весовой комнаты, где предполагается вести взвешивание пудрообразного вещества для фармацевтической промышленности. Конфигурация комнаты, состоящей из трех отсеков, с размещенными в них столами и операторами, показана на рис.7. Воздух подается в комнату через потолок со скоростью 0.02 м/с и отводится через решетку высотой 0.5 м в нижней части передней стенки комнаты. Температура подаваемого воздуха 22°C. Основной вопрос, который ставился проектировщиками - может ли при такой конфигурации помещения и таких условиях вентиляции пудрообразное вещество со стола одного из отсеков попасть в другие отсеки. Если считать температуру в помещении и всех объектов, находящихся в нем (включая операторов), равной температуре подаваемого воздуха, то ситуация окажется вполне приемлемой. Однако, если учесть, что температура тела оператора равна 36°C, то возникающий при этом вертикальный конвективный поток может существенно изменить ситуацию. Правильный же ответ на

поставленный вопрос может дать только лабораторное или математическое моделирование.

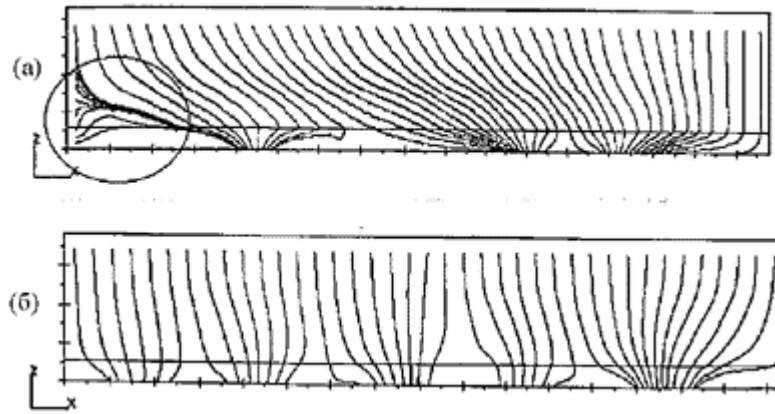


Рисунок 6.

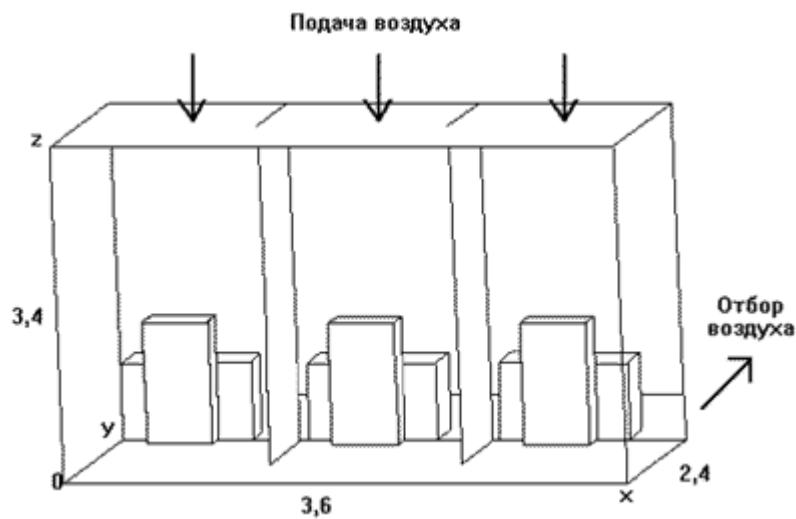


Рисунок 7.

Рассматривается ситуация, когда в каждом из отсеков за столом находится оператор, а пудрообразное вещество имеется только на столе в среднем отсеке. На рис.8 приведены линии тока и распределение концентрации вещества в вертикальном сечении, проходящем через середину среднего отсека для установившегося режима течения. Здесь хорошо виден мощный восходящий конвективный поток и "факел" вещества, переносимого этим потоком от поверхности стола к потолку. Аналогичная картина наблюдается и в вертикальном сечении перпендикулярном оси Oy , проходящем через нагретые боксы, моделирующие операторов (см. рис.9). В параллельном этому сечению около задней стенки (рис.10) наблюдается нисходящий поток. Более того, в нижней части между задней стенкой и полом образуется вихрь с горизонтальной осью, вдоль которой возможен перенос вещества из среднего отсека в соседние. Такой же вывод подтверждают и результаты, приведенные на рис.11 в горизонтальном сечении на уровне пола.

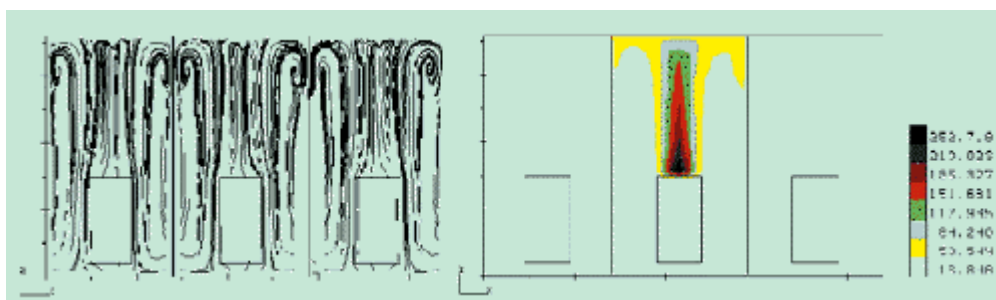


Рисунок 9.

Таким образом, проведенное математическое моделирование показало, что при такой конфигурации и режиме вентиляции вещество из среднего отсека может распространяться в соседние отсеки, что неприемлемо и требуется другое конструктивное решение.

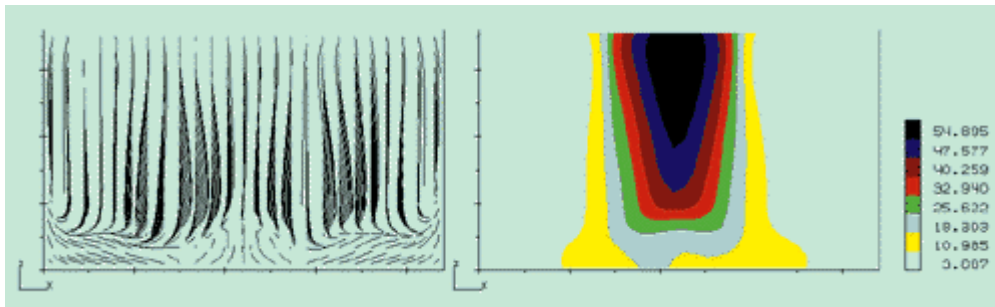


Рисунок 10.

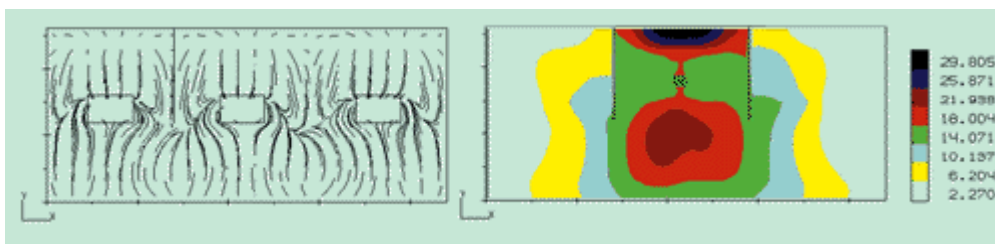


Рисунок 11.

4.4. Экономичный подход оценки температурных факторов в CR

В ряде случаев возникает необходимость оценивать вклад различных источников тепла (вентиляция, технологическое оборудование, оператор и т.п.) в суммарное поле температуры в заданной точке. В данном разделе кратко обсуждается один из возможных подходов к такому анализу, основанный на слабой (линейной) зависимости поля температуры от поля скорости, что часто наблюдается в реальных CR. Основные идеи данного подхода и подтверждение его эффективности путем сравнения с результатами математического моделирования на основе полных уравнений Навье-Стокса обсуждались в [43,44].

Рассмотрим комнату с тепловыми источниками и стоками внутри. Для определения поля температуры в комнате необходимо решать следующее уравнение теплопроводности:

$$= k\Delta T$$

$$= \Delta T_1(x, y, z) + \Delta T_2(x, y, z) + \Delta T_3(x, y, z) + \dots = \sum \Delta T_i(x, y, z)$$

$$= \Delta T_1(x, y, z) + \Delta T_2(x, y, z) + \dots + \alpha \Delta T_i(x, y, z) = \sum_{m=1}^n T_m(x, y, z) + \alpha T_i(x, y, z).$$

мя, T - температура, V - вектор скорости, q - лент теплопроводности.

Было бы удобно оценить влияние каждого теплового источника или теплового стока в суммарном распределении температуры. Предположим что коэффициент теплопроводности и поле скорости не зависят от изменения температуры. При таком предположении уравнение (1) становится линейным. Тогда имеем:

$$\Delta T_1(x, y, z) + \Delta T_2(x, y, z) + \dots$$

$$= \Delta T_1(x, y, z) + \Delta T_2(x, y, z) + \dots$$

$$T(x, y, z) = \sum_{n=1}^N T_n(x, y, z) + \alpha T_0(x, y, z).$$

Таким образом, если известно поле скорости, можно вычислить вклад в изменение температуры каждого теплового источника (стока) по отдельности. Суммарное изменение температуры в присутствии всех тепловых источников и стоков вычисляется с помощью уравнения (2).

Предположим, что мощность i -го теплового источника (стока) изменилась, т.е.

$$= \Delta T_1(x, y, z) + \Delta T_2(x, y, z) + \Delta T_3(x, y, z) + \dots \sum \Delta T_i(x, y, z)$$

$$) = \Delta T_1(x, y, z) + \Delta T_2(x, y, z) + \dots + \alpha \Delta T_i(x, y, z) =$$

$$= \sum_{n=1}^N T_n(x, y, z) + \alpha T_0(x, y, z).$$

где P_i - первоначальная мощность i -го теплового источника (стока), P_i' - измененная мощность i -го теплового источника (стока), α - численный коэффициент. Если предположить, что поле скорости не изменилось значительно, то можно использовать поле скоростей, вычисленное до изменения мощности i -го теплового источника.

С помощью вышеизложенного подхода проектировщик чистой комнаты может оценивать распределение температуры в комнате без пересчета полей давления и скорости. Если мощность одного или нескольких тепловых источников (стоков) изменяется значительно, то эффекты плавучести приводят к значительному изменению поля скорости, и уравнение (4) использовать нельзя. Таким образом вышеприведенный подход можно использовать, если изменение мощности тепловых источников (стоков) не ведет к сильному изменению поля скорости.

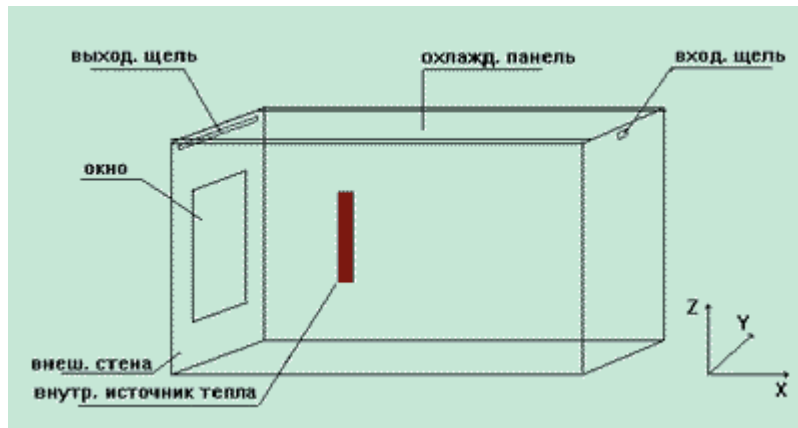


Рисунок 12.

В качестве примера рассмотрим комнату изображенную схематично на рис. 12. Она имеет форму прямоугольного параллелепипеда с размерами 3.6x2.2x2.7 метра. Вверху правой стенки через щель с размерами 0.2x0.08 метра в комнату подаётся воздух со скоростью 1.44 м/с и температурой . На противоположной стенке находится выходное отверстие с размерами 2.0x0.048 метра, через которое отсасывается воздух со скоростью 0.26 м/с. На потолке находится охлаждающая панель (3.6x1.8 м), внутри комнаты имеется внутренний тепловой источник (0.06x0.08x0.75), на левой стенке расположено окно (1.2x1.4 м) выделяющее тепло, внешняя стена и пол также выделяют тепло. Тепловые характеристики всех тепловых источников и стоков привены в таблице.

Вид источника или стока	Кол-во выделяемого (поглощаемого) тепла Дж	Возрастание (понижение) тем-ры при полном смешивании
Окно	107	7.7
Внешняя стена	2.6	0.48
Внутр. источник	519	4.6
Боковые стены и пол	2.5	3.7
Охлаждающая панель	-17.4	-4.4

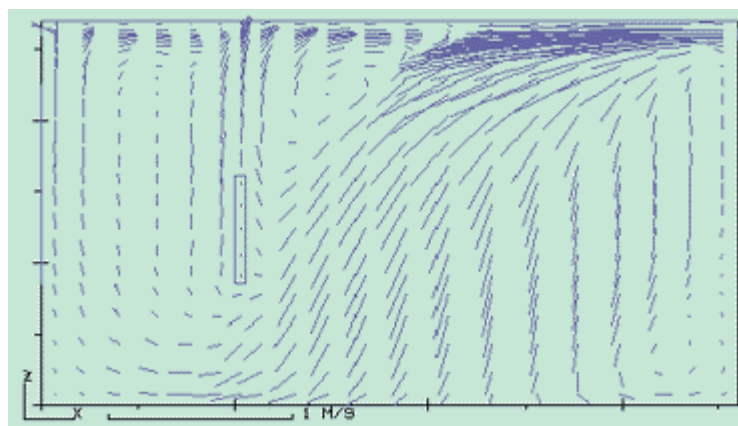


Рисунок 13.

Сначала, используя полную систему уравнений (уравнения Навье - Стокса и теплопроводности) рассчитываем установившиеся поля скоростей и температуры. Поле скоростей в плоскости симметрии показано на рис. 13. Поле температуры в этой же плоскости показано на рис. 14. Затем по вычисленному полю скоростей мы вычисляем изменение температуры обусловленное каждым из источников и стоков в

отдельности. Далее по формуле (2) вычисляем суммарное изменение температуры (рис. 15). Сравнивая рисунки 14 и 15 видим, что они находятся в хорошем соответствии.

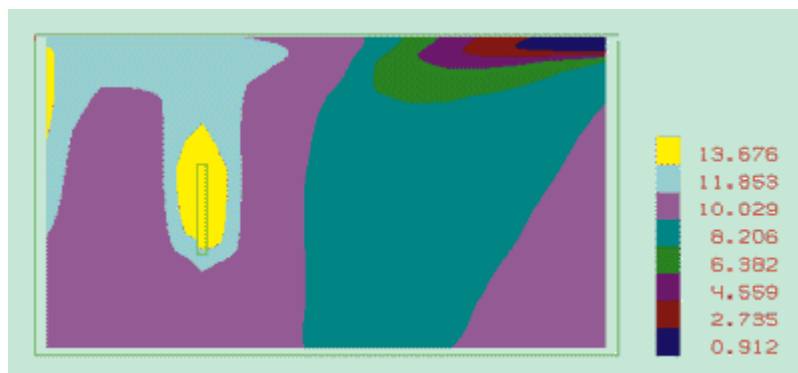


Рисунок 14.

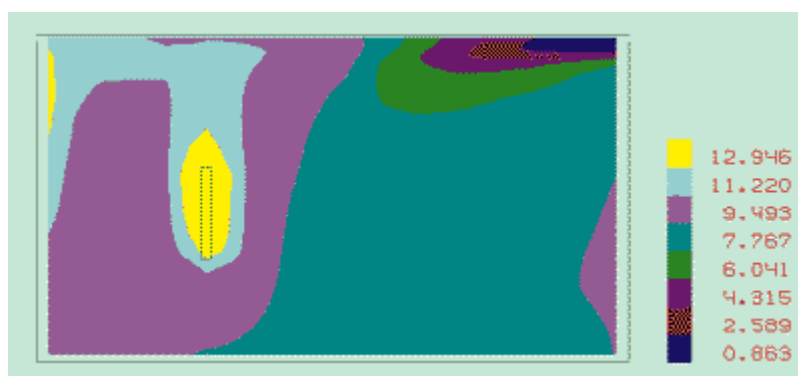


Рисунок 15.

Проведенные вычисления подтверждают, что в случае слабых изменений мощности тепловых источников (стоков), (что часто имеет место в реальных CR) для оценки температуры в помещении необязательно вычислять новое поле скоростей. Возможно использовать старое и, таким образом, существенно сократить время расчетов. Кроме того, проектировщик, используя такой подход, может управлять температурным полем в комнате путем изменения мощности одного или нескольких тепловых источников (стоков). Аналогичный подход справедлив и для оценки загрязнения при наличии различных источников загрязнения.

4.5. Оптимизация формы потолочных светильников для CR

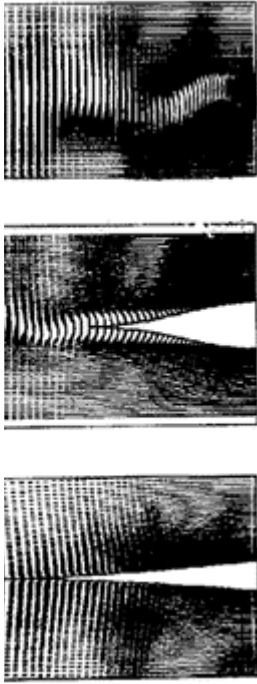


Рисунок 16.

Во многих СР чистый воздух подается в рабочее помещение через перфорированные панели потолка. При обычном способе подачи на светильниках, крепящихся к потолку, и неперфорированных участках потолка под балками крепления фильтров генерируются интенсивные вихри и воздушный поток будет неравномерным и турбулентным. Образуется как бы решетка вихрей, повторяющая решетку балок и светильников. Вдоль осей этих вихрей частицы вещества могут переместиться практически в любое место комнаты, т.е. такое вихреобразование резко ухудшает качество производственного помещения. Таким образом, изучение течений около таких конструкций и оптимизация их формы для уменьшения вихреобразования является очень важной задачей.

Задача профилирования в плоскости годографа, предложенная для профилирования дозвуковой части сопел Лаваля в аэродинамических трубах [45], была модифицирована в данном случае для профилирования формы потолочных светильников. Были получены формы безотрывного обтекания светильников и проведено прямое численное моделирование течения воздуха (вязкой несжимаемой жидкости) около полученных профилей. Течение воздуха в отсутствие светильника при наличии неперфорированного участка, около неоптимизированного и

оптимизированного в смысле отрыва потока профилей показано на рис.16.

Таким образом, предложена оптимальная (безотрывная) форма потолочных светильников. Проведенное прямое численное моделирование с использованием уравнений Навье-Стокса подтвердило полученный результат. Данная форма светильника реализована в экспериментальной СР в НПО "НИКИМТ".

5. Заключение

Разработанный ППП CRAG основан на решении системы уравнений Навье-Стокса, описывающих воздухо, тепло и массоперенос в СР и нашел свое применение при аттестации, экспертизе проектов и при эскизном проектировании реальных СР и их элементов. Использование данного ППП позволило существенно сократить время проектирования, выбрать оптимальные решения, избежать ошибок, сократить сроки и стоимость конечного объекта. Он может использоваться в медицинской промышленности при проектировании ожоговых центров, операционных, реанимационных отделений и т.п., а также в пищевой, химической и других отраслях промышленности. ППП может быть адаптирован и для решения задач вентиляции салонов поездов и автомобилей, офисных и жилых помещений и т.д. Различные версии ППП прошли апробацию в НПО "Ламинар", НПО "НИКИМТ", НПО "Чистый воздух", ЗАО "Экопроект" и в настоящее время закуплен Центром разработки перспективных вычислительных систем (С-DAC, Пуна, Индия) для инсталляции на многопроцессорных вычислительных системах серии PARAM.

Институт автоматизации проектирования РАН располагает в настоящее время многопроцессорными вычислительными комплексами PARAM 8000 и PARAM Open Frame, высококвалифицированными разработчиками и пользователями ППП CRAG и может помочь технологам и проектировщикам СР выбрать оптимальные конструкторские решения при проектировании и перепроектировании чистых комнат.

Благодарности

Автор искренне благодарен академику О.М. Белоцерковскому, обратившему внимание на одну из актуальнейших проблем - проблему создания и математического моделирования "микrokлимата" в СР. Несомненно данная работа является коллективным трудом. На различных этапах создания ППП CRAG,

его модификации и применения принимали участие и продолжают работать мои ученики и коллеги В.Н.Коньшин, И.Н.Кононов, И.Н.Коньшин, П.В.Матюшин, А.В.Костомаров, Е.Р.Павлюкова, И.Н.Родионова, S.Narayanan, G.Chafle, С.А.Александров, А.А.Фионов.

Постоянное совершенствование ППП CRAG происходит благодаря регулярным контактам с членами АСИНКОМ и ICCCS и пользователями пакета.

Разработка ППП CRAG на различных этапах была поддержана НПО "НИКИМТ", компанией "Ассоль ЛТД" и РФФИ.

Литература

1. Hnatek E.R., Tuite J. *Testing and Screening in a TQM Invironment. Proc. of the 37th Annual Technical Meeting, "Technical Solutions Through Technical Cooperation" Inst. of Environmental Sciences, San Diego, California, May 6-10, 1991, pp. 41-46.*
2. Kuchn T.H., Pui D.Y.H., Gratzek J.P. *Numerical results of cleanroom flow modelling exercise. Proc. of the 37th Annual Technical Meeting, San Diego, California, May 6-10, 1991, pp.98-107.*
3. Busnaina A.A. *Modelling of cleanroom air flow and contaminant particle transport. Microelectronic Manufacturing and Testing, 1989, 4, pp.66-69.*
4. Murakami S., Kato S., Suyama Y. *Numerical and experimental study on turbulent diffusion field in convectional flow type cleanroom. ASHRAE Transactions, 1988, 94, 2, pp.469-493.*
5. Suwa Y. *Studies on numerical and transient algorithm for Clean Room efficiency. Proc. of the 10th International Symposium on Contamination Control, Zurich, Switzerland, September 10-14, 1990, pp.40-44.*
6. Busnaina A.A., Abuzeid S. *Modelling of air flow and particle transport in clean rooms: the issue of accuracy and turbulence modelling. Proc. of the 10th International Symposium on Contamination Control, Zurich, Switzerland, September 10-14, 1990, pp.276-280.*
7. Toshigami K. et al. *Finite element analysis of air flow and advection-diffusion of particles in Clean Rooms. Proc. of the 8th International Symposium on Contamination Control, Milan, Italy, September 9-11, 1986.*
8. Hayashi T. et al. *Proposal of air supply method for clean tunnel system. Proc. of the 8th International Symposium on Contamination Control, Milan, Italy, September 9-11, 1986.*
9. Yamamoto T., Donovan R.P., Ensor D.S. *New computational scheme for two-dimensional k-e model on a PC. Proc. of the 37th Annual Technical Meeting, "Technical Solutions Through Technical Cooperation" Inst. of Environmental Sciences, San Diego, California, May 6-10, 1991, pp.108-112.*
10. Busnaina A.A., Abuzeid S. *Submicron particle deposition on a surface in laminar and turbulent flow. Proc. of the 37th Annual Technical Meeting, "Technical Solutions Through Technical Cooperation" Inst. of Environmental Sciences, San Diego, California, May 6-10, 1991, pp.130-139.*
11. Busnaina A.A., Zhu X., Zheng X. *Submicron particle transport and deposition in a CVD chamber. Proc. of the 11th International Symposium on Contamination Control, Westminster, London, September 21-25, 1992, pp.291- 298.*
12. Tsai C.J., Pui D.Y.H., Liu B.Y.H. *Numerical study of transport and deposition of wear particles in computer disk drives. Proc. of the 37th Annual Technical Meeting, "Technical Solutions Through Technical Cooperation" Inst. of Environmental Sciences, San Diego, California, May 6-10, 1991, pp.113-122.*
13. Suwa Y., Yanagisawa H., Nishimura T., Fujii S., Yuasa K. *A numerical study of air flow turbulence behind pleated air filters. Proc. of the 11th International Symposium on Contamination Control, Westminster, London, September 21-25, 1992, pp.279-282.*

14. Fujii S., Yuasa K., Arai Y., Ohigashi N., Suwa Y. Characterization of airflow turbulence behind HEPA filters. *Proc. of the 11th International Symposium on Contamination Control, Westminster, London, September 21-25, 1992*, pp.581-584.
15. Rakoczy T. Design of Clean Production Areas - Large Clean Room Areas for Flexible Utilization. *Proc. of the 8th International Symposium on Contamination Control, Milan, Italy, September 9-11, 1986*.
16. Guetron R., St. Quentin-en-Yvelines. High-performance protection in containment systems. *Proc. of the 10th International Symposium on Contamination Control, Zurich, Switzerland, September 10-14, 1990*, pp.348.
17. Lang E., Kegel B. Optimization of airflow patterns in cleanrooms by 3D numerical simulation.
18. Killingworth D., Ong I.B.S., Whittle G.E. The application of computational fluid dynamics (CFD) in the design of clean rooms and process facilities.
19. Moia E. The control of contamination in the core of pharmaceutical plant: the weighing and dispensing area. *Proc. of the 13th International Symposium on Contamination Control, The Hague, The Netherlands, September 16-20, 1996*, pp.331-342.
20. Lemaire T., Ham P.J., Luscuere P.G. Evaluation of computer flow modelling in operating theatres. *Proc. of the 13th International Symposium on Contamination Control, The Hague, The Netherlands, September 16-20, 1996*, pp.585-592.
21. Fujita T., Sueda A., Hasegawa K., Kimura M., Ura H., Mizunuma Y., Oosawa M., Hayakawa I. Study on airflow distribution in a line type cleanroom system. *Proc. of the 11th International Symposium on Contamination Control, Westminster, London, September 21-25, 1992*, pp.37-42.
22. Toshiaki N. Study on heat current in vertical laminar flow cleanroom. *Proc. of the 10th International Symposium on Contamination Control, Zurich, Switzerland, September 10-14, 1990*, pp.52-56.
23. Kafanov A.Ф., Gaidukov A.D., Alexandrov S.A. Detection of fires in cleanrooms. *Proc. of the 13th International Symposium on Contamination Control, The Hague, The Netherlands, September 16-20, 1996*, pp.626-635.
24. Белоцерковский О.М., Гуцин В.А., Щенников В.В. Метод расщепления в применении к решению задач динамики вязкой несжимаемой жидкости. *Журнал Вычисл. матем. и матем. физ.*, 1975, т.15, N1, стр.197-207.
25. Гуцин В.А. Пространственное обтекание трехмерных тел потоком вязкой жидкости. *Журнал Вычисл. матем. и матем. физ.*, 1976, т.16, N2, стр.529-534.
26. Гуцин В.А. Численное исследование обтекания тела конечного размера потоком несжимаемой вязкой жидкости. *Журнал Вычисл. матем. и матем. физ.*, 1980, т.20, N5, стр.1333-1341.
27. Гуцин В.А. Метод расщепления для решения задач динамики неоднородной вязкой несжимаемой жидкости. *Журнал Вычисл. матем. и матем. физ.*, 1981, т.21, N4, стр.1003-1017.
28. Гуцин В.А., Кононов И.Н. О сдвиговых течениях жидкости, вызванных горизонтальными неоднородностями плотности.
29. Белоцерковский О.М., Гуцин В.А., Коньшин В.Н., Метод расщепления для исследования течений стратифицированной жидкости со свободной поверхностью. *Журнал Вычисл. матем. и матем. физ.*, 1987, т.27, N4, стр.594-609.
30. Gushchin V.A., Konshin V.N. Numerical simulation of the separated fluid flows at large Reynolds numbers. - *International journal for numerical methods in engineering*, 1992, v.34, pp. 469-472.
31. Gushchin V.A., Konshin V.N. Computational aspects of the splitting method for incompressible flow with a free surface. - *Computers Fluids*, 1992, v.21, N3, pp. 345-353.
32. Gushchin V.A., Konshin V.N. Unsteady and transitional separated fluid flows - direct simulation. - *The 3d Russia-Japan joint symposium on computational fluid dynamics. Book of abstracts, part II, August 25-30, 1992, Vladivostok, Russia, 1992*, pp.5-6.

33. Гуцин В.А., Копысов А.Н. Динамика сферического пятна в стратифицированной жидкости и его акустическое излучение. Журнал Вычисл. матем. и матем. физ., 1991, т.31, №6, с.850-864
34. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. М., Физматлит, 1994, 448с.
35. Гуцин В.А., Кононов И.Н., Коньшин В.Н., Коньшин И.Н. Программный комплекс для оценки аэродинамики проектируемых ЧПП. Сб. докл. 4-ой науч.техн. конф. "Достижения и перспективы технологической экологии микроэлектроники в чистых производственных помещениях", 25-26 июня 1992, МИЭТ, Москва, 1992, с.182-187
36. Gushchin V.A., Kononov I.N., Konshin V.N., Konshin I.N. Parallel numerical modelling of clean room air flows. The third Russia-Japan joint symposium on computational fluid dynamics. Book of abstracts, part II, August 25-30, 1992, Vladivostok, Russia, pp. 121-122.
37. Gushchin V.A., Narayanan P.S., Chafle G. Parallel computing of industrial aerodynamics problems: clean rooms. Parallel Computational Fluid Dynamics: Algorithms and Results Using Advanced Computers. P.Schiano, A.Ecer, J.Periaux and N.Satofuka (Editors), 1997, Elsevier Science B.V.
38. Гуцин В.А., Кононов И.Н., Коньшин В.Н., Коньшин И.Н., Александров С.А., Численное моделирование и натурные измерения воздушных потоков в чистых производственных помещениях. Сб. докладов 3-й конф. Ассоциации инженеров по контролю микрозагрязнений, 7-10 июня 1993, АСИНКОМ, С.-Петербург, 1993, с.183-192
39. Гуцин В.А. Математическое моделирование и его место в проблеме чистых помещений. Сб. докладов 2-й конф. Ассоциации инженеров по контролю микрозагрязнений, 12-16 окт. 1992, АСИНКОМ, Суздаль, 1992, с.124-126
40. Кононов И.Н., Коньшин В.Н., Коньшин И.Н. Численный анализ потоков воздуха в чистом производственном помещении. Сб. докладов 2-й конф. Ассоциации инженеров по контролю микрозагрязнений, 12-16 окт. 1992, АСИНКОМ, Суздаль, 1992, с.136-140
41. Гуцин В.А., Кононов И.Н. Применение методов вычислительной гидродинамики в практике проектирования чистых комнат и их элементов. "Технология чистоты", 1994, №2, сс.24-26
42. Gushchin V.A., Kostomarov A.V. Numerical simulation of air, heat and mass transfer in clean rooms. Proc. of the 13th International Symposium on Contamination Control, The Hague, The Netherlands, September 16-20, 1996, pp.593-598.
43. Kobayashi H., Murakami S., Kato S. New scales for assessing contribution of heat sources and sinks to air and temperature distributions in room based on numerical simulation. Proc. of the 12th ICCCS in Yokohama, 1994, pp.333-340
44. Гуцин В.А., Костомаров А.В. Об одном экономичном подходе к оценке температурных факторов в ЧПП. Сб. докладов 5-й конференции АСИНКОМ, Москва, 6-8 июня, 1995, сс.45-52
45. Shifrin E.G., Podsypanina N.A. - One method of profiling short plane nozzles, Fluid Dynamics, 1975, N1