Модели и методики численного решения задачи расчета воздушных течений в областях сложной геометрии, в том числе – в условиях городской застройки.

Характер атмосферной циркуляции определяется множеством факторов - динамических, термических, синоптических, влажностных и т.п. Динамика процессов определяется нелинейными механизмами адвекции, турбулентного обмена, влиянием градиентов давления. Термические факторы обусловливают развитие бризовых циркуляций, температурно-влажностный суточный цикл, плотностную конвекцию в виде мощных восходящих токов или напротив, формирование инверсионных слоев, препятствующих развитию обменных процессов. В пограничном слое атмосферы, примыкающем к поверхности земли, важную роль играют орографические неоднородности – такие, как депрессии и возвышения рельефа, городские застройки и уличные каньоны, лесные массивы, водоемы и т.п. Эти факторы оказывают вынуждающее динамическое воздействие на воздушные потоки и обусловливают формирование сложной картины течения с сильной изменчивостью в пространстве и времени. Задача воспроизведения таких течений связана с нетривиальными проблемами численного анализа, гидродинамики, теории турбулентности и др.

Подобные задачи возникают при исследовании и проектировании производственных помещений, где имеется необходимость обеспечения высокого класса чистоты воздуха с жесткими ограничениями на концентрацию загрязняющих веществ, температуру и влажность[Kuehn, 1988]. Инженерные методики, традиционно используемые при решении таких задач, основаны на некоторых простых решениях уравнений тепломассообмена и, как правило, не могут дать адекватной картины воздушных течений в помещении. С другой стороны, более надежное лабораторное или физическое моделирование этих процессов оказывается неоправданно дорогим.

Мощным и эффективным средством описания атмосферных течений в сложных областях является численное моделирование [Белоцерковский,1994; Марчук,1982; Пененко,Алоян, 1985]. Следовательно, возникает необходимость создания алгоритмов, предназначенных для моделирования динамики пространственных турбулентных течений воздуха над территорией с произвольной геометрией.

При постановке задачи и разработке методики ее решения, необходимо отчетливо представлять круг решаемых задач, которые определим следующим образом:

- расчет пространственной нестационарной циркуляции атмосферы в ограниченных областях с заданной конфигурацией подстилающей поверхности в виде городских агломераций, растительности, водных объектов и т.п.

- расчет течения воздуха внутри помещения с расположенным оборудованием, наличием перегородок и строительных конструкций, источников тепла, влаги, загрязняющих примесей и систем вентиляции;

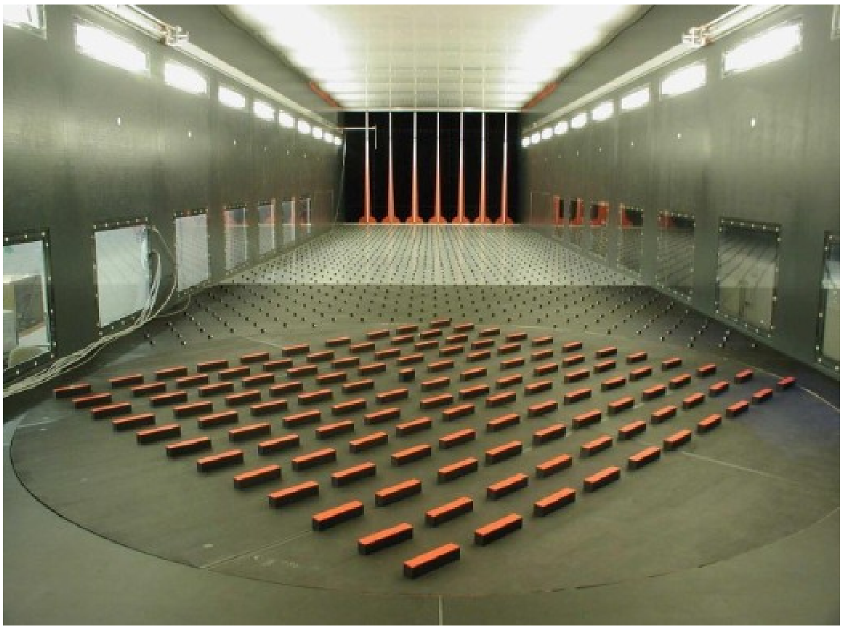
- расчет пространственно-временного перераспределения полей температуры, влажности с учетом фазовых переходов, а также концентрации загрязняющих пассивных примесей.

Начиная с середины XX века, процесс урбанизации общества происходит высокими темпами, охватывая все большее число развивающихся стран. Наиболее интенсивно растут сверхкрупные и крупнейшие города, которые, как считается, полнее удовлетворяют многообразные запросы людей. Опыт даже наиболее успешно развивающихся мегаполисов свидетельствует о трудностях решения целого ряда проблем, связанных с обеспечением благополучной в социально- экономическом отношении среды обитания горожан. Эти проблемы характерны и для большинства российских городов, многие из которых признаются экспертами зонами экологического бедствия. Наиболее важным элементом городских территорий любого мегаполиса являются зоны плотной жилой застройки центральной (исторической) части города, где требуется обеспечить в максимальной степени социальный и экологический комфорт населения при рациональном использовании ресурсов и городских земель. Основными источниками загрязнения воздуха жилых территорий являются промышленные предприятия, отопительные котельные и автомобильный транспорт. Среди них наиболее значительную долю загрязнения атмосферного воздуха в пределах жилых территорий вносит автотранспорт. Специфика автотранспорта, как подвижного источника загрязнения, проявляется в низком его расположении и непосредственной близости к зонам жилой застройки. Все это приводит к тому, что автотранспорт создает в городах обширные и устойчивые зоны, в пределах которых предельно- допустимая концентрация загрязняющих веществ в атмосферном воздухе превышена в несколько раз.

Современные методы вычислительной гидродинамики позволяют решать задачи, связанные с переносом атмосферных примесей внутри городской застройки. Однако, необходимо учитывать тот факт, что правильное прогнозирование турбулентной структуры воздушного потока обеспечивает корректное моделирование не только полей скорости и давления, но и процессов, связанных с рассеянием и турбулентным перемешиванием выбросов в атмосфере города. Поэтому особое внимание необходимо уделять методике моделирования турбулентности, а также схеме турбулентного замыкания в рамках выбранного подхода.

Комбинация различных форм крыш зданий и местной топографии могут оказывать влияние на интенсивность генерации вихрей, так как сохраняется высокая степень турбулентности даже в условиях относительно низкой скорости ветра. В дополнении к этому перемежаемость иногда приводит к сохранению средней циркуляции, которая, по -видимому, проникает на самый низкий уровень измерений. Иногда в короткие промежутки времени существуют вторичные рециркуляции в нижней части каньона в условиях низкой турбулентности и малой скорости ветра. Результаты измерений показывают, что внутри городского каньона существует высокая степень вертикального перемешивания. Исследователями было обнаружено, что основной фактор, влияющий на картину распространения выхлопов автотранспорта в уличном каньоне, есть конфигурация каньона, то есть его форма и размер.

К настоящему моменту существует большое количество наборов данных для верификации математических моделей, таких как MUST (Mock Urban Setting Trial) [Yee, 2004] и др. На рис.1 представлен пример массива препятствий для построения физической модели городской застройки.



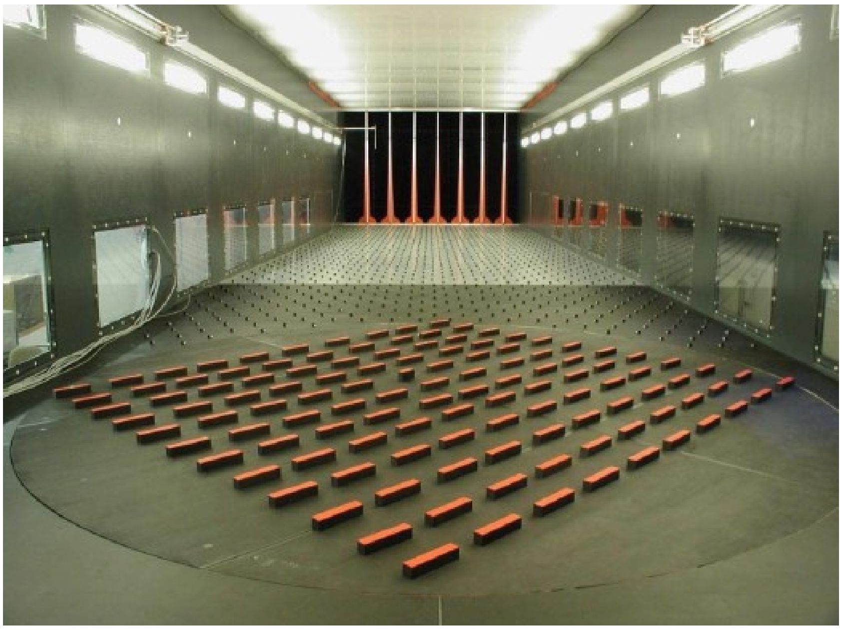


Рис. 1. Модель массива препятствий эксперимента MUST в аэродинамической трубе.

Основой численной модели является система нестационарных уравнений Навье-Стокса для вязкого несжимаемого газа, записанная в прямоугольной системе координат в приближении теории свободной конвекции. Мелкомасштабный спектр турбулентных пульсаций исключается из исходных уравнений с применением операции фильтрации

[Атмосферная турбулентность…,1985], а его влияние параметризуется с помощью градиентно-диффузионного замыкания. Упорядоченные движения и крупновихревая часть турбулентного спектра рассчитывается явно из решения фильтрованной нестационарной системы уравнений [Moeng, 1984; Nieustadt e.a.,1991].

Компьютерная реализация трехмерных моделей представляют серьезные проблемы даже для современных высокопроизводительных вычислительных систем. Эффективность решения сложных систем уравнений в частных производных существенно зависит от характера дискретизации расчетной области, способов аппроксимации искомых функций и получения конечно-разностных аналогов уравнений, применяемой методологии решения сеточных систем и разрешения ряда других проблем. Ниже представлены узловые проблемы численной реализации и основные подходы, используемые при конструировании модели.

Методы решения уравнений основаны на дискретизации исходных систем в сеточной области. Используются неравномерные прямоугольные сетки с узлами, разнесенными по граням элементарного пространственного бокса. "Расшатанные" сетки позволяют строить консервативные разностные схемы, а применяемые неявные методы обеспечивают устойчивость метода при долгопериодном интегрировании.

Для решения системы уравнений гидротермодинамики воздушного потока используется метод конечных разностей с предварительным расщеплением по физическим процессам [Марчук,1977]. Метод расщепления формулируется как класс конечно-разносных алгоритмов и применяется для выделения следующих этапов 1) перенос и турбулентная диффузия; 2) динамическое согласование полей; 3) фазовые переходы влаги. При выборе конкретной формы уравнений на дробных шагах необходимо исходить из требования эффективной реализации и абсолютной устойчивости схемы. Так, для достижения нужной точности необходимо проводить вычисления с малыми шагами по времени и пространству. Однако во многих случаях можно использовать схемы второго порядка точности, что существенно экономит расчетное время и позволяет выбирать достаточно большие конечно-разностные шаги.

При решении разностных краевых задач в сложных нерегулярных областях возникают трудности удовлетворения граничных условий, где теряется простота и универсальность традиционных методов, разработанных для регулярных областей. Здесь успех может достигаться, например, применением метода конечных элементов. Однако вычислительная реализация этого метода значительно сложнее, чем метода конечных разностей. При этом попытка построения численных моделей с помощью метода конечных элементов приводит к необходимости конструирования базисных функций в виде трехмерных симплексов, алгоритмические манипуляции с которыми невероятно сложны и громоздки, так что по существу пространственные конечно-элементные модели не нашли широкого применения. Другая классическая возможность связана с применением обычных разностных схем на регулярных сетках со специальной аппроксимацией вблизи границ. Недостатком здесь является отсутствие универсальности методики, когда для различных типов границ необходимо конструировать уникальные разностные соотношения.

Интересным представляется метод сквозного счета, построенный на основе применения принципа фиктивных областей [Вабищевич,1991]. Суть метода фиктивных областей состоит в дополнении фактической области интегрирования со сложной геометрией фиктивными областями до параллелепипеда с целью более удобной для численной реализации формы и в доопределении системы уравнений модели специальными условиями ее продолжения в фиктивных областях. Именно, вводится малый параметр продолжения ε по старшим или младшим коэффициентам и рассматривается краевая задача в расширенной прямоугольной области. Краевые условия сносятся на регулярные границы и сравнительно просто реализуются, но возникает задача с разрывными коэффициентами внутри области. К недостаткам метода следует отнести также отсутствие теоретических критериев сходимости итерационного процесса и невозможность получения оценок близости решений для многомерных нелинейных задач. Вместе с этим, метод сочетает алгоритмическую прозрачность, технологичность программной реализации и возможность более или менее адекватного воспроизведения сложных границ. Последнее обстоятельство оказалось решающим при выборе алгоритма аппроксимации границ и в качестве базового метода решения краевой задачи принят метод фиктивных областей.

Прямое описание мелкомасштабных элементов циркуляции обусловливает формирование высокоградиентных и динамичных расчетных полей. Поэтому важным этапом разработки численной модели является выбор высокоточных монотонных схем решения уравнения адвекции, обеспечивающих получение неосциллирующих решений. Схема должна также обладать свойством транспортивности [Роуч,1980], которое заключается в запрете адвективного распространения возмущения против вектора скорости.

В вычислительной гидродинамике широкое распространение получили разностные TVD-схемы [Куликовский и др, 2001] с ограниченной полной вариацией (Total Variation Diminishing, TVD). Схемы этого класса удовлетворяют всем перечисленным выше требованиям. В частности, семейство схем Хартена [Harten,1983] открыло путь к созданию монотонных аппроксимаций уравнения адвекции с выполнением законов сохранения. Явная схема Чакравоти-Ошера [Chakravarthy, Osher, 1985] с TVD-ограничителем имеет на участках плавного изменения второй порядок точности, а в областях высоких градиентов трансформируется в схему с направленными разностями первого порядка. TVD-свойство гарантирует, в частности, неотрицательность численных полей – таких, как концентрация примеси. Однако, условия устойчивости явных схем накладывают жесткие ограничения на выбор параметров дискретизации, в том числе, на временной шаг. Эти ограничения можно существенно ослабить путем построения неявных TVD-схем. Опыт конструирования таких алгоритмов имеется в работах [Chakravarthy,1984; Yee, 1987].

Важное место в теории итерационных методов занимают методы неполной факторизации [Ильин, 1995], предназначенные для решения трехмерного уравнения Пуассона. Принципы их конструирования основаны на формальном обобщении безытерационного метода прогонки для решения одномерных задач, сводящемуся к разложению ленточной матрицы на произведение нижней и верхней треугольных матриц.

Расчетные поля скоростей и характеристик турбулентности, полученные в результате решения гидродинамической задачи, позволяют исследовать процессы переноса и диффузии опасных и загрязняющих примесей, в частности, распространение аэрозолей в городском ландшафте. При известном местоположении источника примеси и интенсивности эмиссии задача решается прямым интегрирование уравнения переноса пассивной субстанции с заданной правой частью. При этом используются алгоритмические подходы, представленные выше.

Литература.

1. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей. Л.,Гидрометеоиздат, 1985, 351 с.
2. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. М.: Физматлит, 1994.
3. Вабищевич П.Н. Метод фиктивных областей в задачах математической физики. Изд-во МГУ, 1991, 345 с.
4. Ильин В.П. Методы неполной факторизации для решения алгебраических систем. М.: Наука. Физматлит. 1995. 287 с.
5. Куликовский А.Г., Погорелов Н.В., Семенов А.Ю. Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений. М., Физматлит, 2001, 608 с.

6. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982.
7. Марчук Г.И. Методы расщепления и переменных направлений М. ОВМ, 1986. 334 с.
8. Пененко В.В., Алоян А.Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985.
9. Ракитский Ю.В., Устинов С.М., Черноруцкий И.Г. Численные методы решения жестких систем. М., Наука, 1979.
10. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М., Мир, 1980, 616 с.
11. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1977.
12. Chakravarthy S.R. Relaxation method for unfactored implicit upwind schemes. AIAA Paper.1984. №84-0165.
13. Chakravarthy S.R., Osher S. A new class of high accuracy TVD schemes for hyperbolic conservation laws. AIAA paper.1985. №85-0363.
14. Harten A.A. High resolution schemes for the computation of weak solution of hyperbolic conservative laws. J. Comp. Phys. 1983. V. 49, № 3, p. 357-393.
15. Kuehn T.H. Computer Simulation of Airflow and Particle Transport in Clean Room. // J. Environ. Sci. 1988. No. 9/10. P 21-27.
16. Moeng C.-H. A Large-Eddy-Simulation model for the Study of Planetary Boundary Layer Turbulence. J. Atmos. Sci., 1984, v. 41, № 13, p 2052–2062.
17. Nieustadt F.T.M., Mason P.J., Moeng C.-H., Schumann U. Large-Eddy simulation of the convective boundary layer: a comparison of four computer codes. - Selected Papers from the 8-th Symposium on Turbulent shear flow, Springer - Verlag, New York, 1991, p.343-367.
18. Yee H.S. Construction of explicit and implicit symmetric TVD schemes and their application. J. Comp. Phys. 1987. V. 68, № 1, p. 151-179.
19. Yee E., Biltoft C.A. Concentration fluctuation measurements in a plume dispersing through a regular array of obstacles. Boundary -Layer Meteorology. – 2004. – V. 111. – P. 363-415.