

На правах рукописи

Данилкин Евгений Александрович



**Вихреразрешающее моделирование турбулентных течений и
переноса примеси в уличных каньонах с использованием
многопроцессорных вычислительных систем**

05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2010

Работа выполнена на кафедре вычислительной математики и компьютерного моделирования ГОУ ВПО «Томский государственный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Старченко Александр Васильевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Бубенчиков Алексей Михайлович

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Тимченко Сергей Викторович

Ведущая организация: Институт вычислительной математики
РАН, г. Москва

Защита состоится 24 июня 2010 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 212.267.08 при ГОУ ВПО «Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, 2-й учебный корпус, ауд. 102.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке ГОУ ВПО «Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 34а.

Автореферат разослан 21 мая 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



А.В. Скворцов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время более половины населения Земного шара проживает на урбанизированных территориях, причем количество городов-миллионников неуклонно растет. Такая ситуация приводит к появлению целого ряда экологических проблем, некоторые из них связаны с качеством атмосферного воздуха. Для понимания аэродинамических процессов, происходящих в городской застройке вблизи линейных (автомобильных дорог) и точечных источников, и для решения проблем охраны окружающей среды наряду с приборным контролем состава атмосферного воздуха активно применяются методы математического моделирования, которые позволяют численно предсказывать детальную картину распределения концентраций газовых составляющих, загрязняющих атмосферный воздух, на основе решения сложной системы многомерных нестационарных уравнений. Особо важную роль в распространении примеси между зданиями играет турбулентность, поскольку скорость движения воздуха в городской застройке относительно невелика.

На современном этапе развития теории турбулентности моделирование турбулентных течений в окружающей среде осуществляется, в основном, с использованием осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса и переноса (RANS-подход), для которых требуется решить проблему замыкания путем привлечения полуэмпирических моделей различного уровня сложности. Несмотря на то, что этот подход позволяет получить успешные результаты для целого ряда турбулентных течений (А.Ф. Курбацкий, А. С. Гиневский, Г.С. Глушко, В.М. Иевлев, В.Е. Launder, W. Rodi и др.), тем не менее, он дает низкую точность при описании нестационарных турбулентных течений вблизи плохообтекаемых тел. Это объясняется определенными физическими особенностями отрывных течений, а именно, наличием в них организованных нестационарных вихревых структур, параметры которых определяются геометрическими характеристиками рассматриваемого течения и граничными условиями.

В таких случаях метод моделирования крупных вихрей (LES-подход) оказывается более предпочтительным, так как он хорошо предсказывает нестационарную структуру турбулентного течения и позволяет явно разрешать крупные вихри вплоть до размера ячейки расчетной сетки, а вихри меньшего масштаба моделируются с помощью различных подсеточных моделей. Вихреразрешающему моделированию турбулентных течений посвящены работы О.М. Белоцерковского, А.М. Липанова, Ю.Ф. Кисарова, Ю.И. Хлопкова, А.В. Глазунова, К.Н. Волкова, J.W. Deardorff, W. Rodi, P. Moin, M. Germano, D.K. Lilly, S. Ghosal и др., однако широкое применение LES-подхода для исследования течений в окружающей среде сдерживается высокими требованиями к их численной реализации. Вихреразрешающее моделирование, в том числе и в элементах городской застройки, нуждается в численных схемах высокого порядка аппроксимации и высокопроизводительных вычислительных алгоритмах, подразумевающих использование многопроцессорной вычислительной техники для получения результатов моделирования за приемлемое время.

Целью диссертационной работы является построение вихреразрешающей модели турбулентных течений и переноса примеси в уличных каньонах и

численного метода ее решения на многопроцессорных вычислительных системах с распределенной памятью.

Для достижения данной цели поставлены и решены следующие **основные задачи**:

1. Построение вихреразрешающей модели турбулентных течений и переноса примеси в уличных каньонах.
2. Разработка и апробация адаптированного на многопроцессорную вычислительную технику с распределенной памятью численного метода решения уравнений Навье-Стокса, описывающих движение несжимаемой среды, и адвективно-диффузионных уравнений, представляющих перенос примеси.
3. Численное исследование влияния соотношения ширины и высоты уличного каньона, расположения источника примеси и скорости потока воздуха на структуру течения и распространение концентрации примеси.

Научная новизна полученных автором результатов заключается в следующем:

1. Построена и впервые применена для исследования турбулентных отрывных течений и переноса пассивной газообразной примеси в городской застройке нестационарная трехмерная вихреразрешающая модель, учитывающая влияние плохобтекаемых препятствий и их шероховатости на поведение потока и распределение концентрации примеси.
2. На задачах турбулентного течения в канале и обтекания цилиндра квадратного сечения на основе вычислительного эксперимента впервые показано, что для корректного расчета параметров потока и его турбулентной структуры с помощью используемой вихреразрешающей модели, опирающейся на явные разностные схемы второго порядка аппроксимации в сочетании с динамической подсеточной моделью, лучшие результаты показывает применение противопотоковой схемы QUICK Леонарда для аппроксимации конвективных членов по сравнению с центрально-разностными схемами или противопотоковой схемой MLU.
3. На основе вычислительных экспериментов, проведенных на многопроцессорной вычислительной системе с распределенной памятью для рассматриваемых в работе задач, впервые показано, что необходимая для получения результатов за приемлемое время параллельная реализация вихреразрешающей модели турбулентности должна использовать двумерную геометрическую декомпозицию сеточной области исследования, а также параллельный алгоритм сопряженных градиентов в сочетании с предобуславливанием по методу Зейделя с красно-черным упорядочиванием для решения разностного эллиптического уравнения для поправки давления.
4. Впервые с использованием вихреразрешающей модели турбулентности проведено исследование влияния соотношения ширины и высоты уличного каньона, расположения источника примеси и скорости потока воздуха на структуру течения и распространение концентрации примеси. Выявлено существование трех режимов циркуляции воздуха внутри каньона в зависимости от его геометрических параметров.

Теоретическая значимость диссертационного исследования состоит в развитии теории турбулентности в части вихреразрешающего моделирования турбулентных течений и переноса примеси в окружающей среде. Это открывает перспективы в применении вихреразрешающего моделирования для решения фундаментальных экологических проблем, связанных с качеством атмосферного воздуха.

Практическая значимость работы определяется тем, что разработанные и апробированные в рамках диссертационной работы методы, могут быть применены для ускорения расчетов при численном моделировании реальных турбулентных течений. Предложенная и реализованная для многопроцессорной вычислительной техники математическая модель позволяет рассчитывать структуру турбулентного течения воздушных масс и предсказывать зоны превышения предельно допустимых концентраций примеси для конкретных участков городской застройки.

Работа выполнялась в соответствии с основными направлениями НИР Томского государственного университета в рамках темы 1.12.06 ЕЗН Министерства образования РФ, а также по научным проектам, поддержанным грантами РФФИ (№ 09–05–01126, № 08–05–90711–моб_ст) и программой СКИФ-ГРИД (№ 2007–СГ–04/3, № 2009–СГ–04/5).

Материалы проведенных исследований включены в программу специального курса лекций, читаемого на механико-математическом факультете ТГУ.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов, сделанных в диссертационной работе, основана на корректном применении фундаментальных уравнений механики сплошных сред и следует из адекватности физических и математических моделей и численных методов, используемых в работе, что подтверждается сравнением с результатами экспериментов, а также с известными теоретическими данными других авторов.

На защиту выносятся:

1. Вихреразрешающая модель для исследования турбулентных течений и переноса примеси в уличных каньонах.
2. Численный метод решения системы уравнений Навье-Стокса для несжимаемой среды и его параллельная реализация на многопроцессорной вычислительной системе с распределенной памятью.
3. Результаты исследования эффективности и масштабируемости разработанных параллельных численных алгоритмов. Предложенные и обоснованные способы декомпозиции расчетной области при численном решении систем дифференциальных уравнений на многопроцессорной вычислительной технике с распределенной памятью.
4. Результаты математического моделирования турбулентных течений и переноса примеси в уличных каньонах.

Личный вклад автора: Данилкин Е.А. под руководством профессора Старченко А.В. построил математическую модель турбулентного течения. Разработал эффективную параллельную реализацию численного решения уравнений Навье-Стокса, описывающих движение несжимаемой среды. Осуществил сравнение различных способов декомпозиции расчетной области по вычисли-

тельным узлам и выявил наиболее эффективный из них с точки зрения минимизации вычислительных затрат без потери в масштабируемости решаемой задачи. Построил параллельные алгоритмы реализующие рассматриваемые методы решения систем линейных алгебраических уравнений, определив особенности этих методов и возможность их применения для решаемой задачи. Осуществил тестирование модели турбулентности и переноса примеси.

Основные результаты диссертации доложены соискателем на 5-ти международных, 3-х всероссийских и 3-х региональных научных и научно-практических конференциях в Санкт-Петербурге, Казани, Новороссийске, Новосибирске, Красноярске, Томске и полностью представлены в 8 опубликованных работах, в том числе в 1 статье в издании из списка ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения; общий объем работы – 138 страницы; работа содержит 7 таблиц и 45 рисунков; список цитируемой литературы включает 112 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы основные цели и задачи. Подчеркнута научная новизна и практическая значимость работы. Перечислены положения, выносимые на защиту, дано краткое изложение содержания диссертационной работы по главам.

В первой главе кратко описана структура развитого турбулентного течения, дано обоснование использования метода крупных вихрей в теории турбулентности. Рассматриваются основные подходы к моделированию турбулентных течений и особенности, связанные с их реализацией. На основе литературных источников приводятся характерные черты вихреразрешающего моделирования, оказывающие существенное влияние на результаты моделирования (например, порядок аппроксимации конвективных слагаемых и выбор схемы аппроксимации), а также описываются используемые в расчетах подсеточные модели и приводится их иерархическая структура. Представлена процедура построения динамической модели. С математической и физической точек зрения описаны трудности задания граничных условий при использовании вихреразрешающего моделирования турбулентности. Уделено внимание применению современной высокопроизводительной вычислительной техники в реализации математических моделей. В заключительной части главы формулируются основные требования, предъявляемые к современным математическим моделям, реализующим вихреразрешающее моделирование турбулентности.

Вторая глава представляет математическую формулировку задачи турбулентного течения несжимаемой среды вокруг плохообтекаемых тел, которая была поставлена на основе предварительного обзора литературных источников с обоснованием предпочтительности того или иного подхода.

Математическая модель трехмерного нестационарного турбулентного движения несжимаемой среды включает в себя отфильтрованные уравнения Навье-Стокса:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad i=1,2,3, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0. \quad (2)$$

Здесь $\bar{u}_i$ – отфильтрованные проекции мгновенного вектора скорости на оси координат Ox_i ; $\bar{p}$ – мгновенное значение давления; ν – кинематическая вязкость; ρ – плотность; τ_{ij} – тензор подсеточных напряжений. По повторяющемуся индексу j проводится суммирование.

Отфильтрованное транспортное уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{C}}{\partial x_j} = \alpha \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial q_j}{\partial x_j} + S, \quad (3)$$

где $\bar{C}$ – концентрация или температура, S – функция, описывающая распределение источников, α – коэффициент диффузии, q_j – подсеточный поток массы или тепла.

Из-за наличия в системе уравнений (1)–(3) слагаемых τ_{ij} и q_j она является незамкнутой, для ее замыкания использовалась одна из двух подсеточных моделей:

1. Модель Смагоринского¹ с постоянным коэффициентом C_s :

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} \approx \tau_{ij}^{smag} = -\nu_T \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right), \quad (4)$$

где ν_T – турбулентная вязкость. Турбулентная вязкость определяется средним значением скорости диссипации энергии турбулентности, приходящейся на единицу объема, и масштабом подсеточных вихрей:

$$\nu_T = C_s^2 \Delta_g^2 |\bar{S}|, \quad (5)$$

где C_s – постоянная Смагоринского, $\Delta_g = h$ – шаг сетки модели, $|\bar{S}| = \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}}$ –

норма тензора скорости деформации, $\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$.

2. Динамическая модель² (Dinamic Model, DM), в которой коэффициент Смагоринского C_s подбирается исходя из анализа информации, содержащейся в разрешимых масштабах движения, и является величиной зависящей от пространственных координат и времени. Подробно динамическая модель описана в первой главе, в третьей главе представлена ее численная реализация.

¹ Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations // Monthly Weather Review. 1963. Vol. 91, №. 3. P. 99–165.

² Germano M., Piomelli U., Moin P., Cabot W.H. A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model // Phys. Fluids. A. 1991. Vol. 3. P. 1760–1765.

В третьей главе приведена процедура численного решения поставленной задачи. На примере нестационарного трехмерного уравнения переноса показано, как происходит дискретизация исходной дифференциальной задачи и получение конечно-разностного аналога. Для аппроксимации использовался метод конечного объема. Основная идея этого метода заключается в разбиении расчетной области на непересекающиеся, граничащие друг с другом конечные объемы так, чтобы один узел расчетной сетки содержался только в своем конечном объеме. Значения компонент скорости определяются на гранях конечных объемов, а скалярные характеристики – в центре. После разбиения расчетной области описанным способом, уравнение переноса интегрировалось по каждому конечному объему. При вычислении интегралов применялась кусочно-полиномиальная интерполяция для зависимых величин. Аппроксимация конвективных членов уравнения переноса выполнялась с использованием одной из четырех схем: противопотоковой схемы MLU Ван Лира³, схемы Леонарда QUICK⁴, центрально-разностных схем второго или четвертого порядка. Для решения уравнений движения применялась явная схема по времени (Адамса-Бэшфорда). В результате получена разностная схема второго порядка аппроксимации по времени и пространству, являющаяся условно устойчивой.

В гидродинамической части модели для согласования полей скорости и давления использовалась схема предиктор-корректор, в соответствии которой явная схема Адамса-Бэшфорда для уравнения движения выполняла функцию предиктора, а коррекция поля скорости выполнялась на основе решения уравнения Пуассона для поправок давления. Рассмотрено несколько способов решения системы линейных алгебраических уравнений для отыскания поправок давления: метод Зейделя, метод сопряженных градиентов (CG), метод бисопряженных градиентов со стабилизирующими коэффициентами (BiCGStab) и явный метод Булеева. Произведен выбор оптимального как с точки зрения минимизации количества итераций, требуемых для его сходимости, и времени на вычисления, так и с точки зрения возможности масштабирования распараллеленного метода на большое количество вычислительных узлов и эффективности его параллельной реализации. Описано использование предобуславливателей для улучшения сходимости методов сопряженных направлений, разработанных на основе метода Зейделя с красно-черным упорядочиванием или метода неполной факторизации Булеева.

Проведено тестирование полученного численного алгоритма решения уравнений Навье-Стокса на задаче исследования ламинарного течения в плоском канале при низких числах Рейнольдса. Результаты показали хороший уровень соответствия данных численного моделирования и приближенного аналитического решения⁵ для рассматриваемой задачи (рисунок 1). В заключение

³ Van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme. II. Monotonicity and conservation combined in a second order scheme // J. of Computational Physics. 1974. Vol. 14. P. 361–370.

⁴ Leonard B. A Stable and Accurate Convective Modeling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1979. Vol. 19. P. 59–98.

⁵ Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплоприемниках. М., 1982. 472 с.

представлена численная реализация динамической процедуры вычисления турбулентной вязкости.

При расчёте течений в областях сложной геометрии в данной работе



Рисунок 1 – Распределение осевой скорости ламинарного течения в начальном участке плоского канала

использовался метод фиктивных областей, суть которого заключается в том, что значения векторных и скалярных величин в области преграды равны нулю и на границах фиктивных конечных объемов отсутствуют диффузионные потоки.

Четвертая глава посвящена описанию технологии организации параллельных расчетов, рассматриваются вопросы распределения вычислительной нагрузки между процессорами. В качестве основного подхода распараллеливания выбрана геометрическая декомпозиция сеточной области. В рассматриваемом случае возможны три различных способа разделения значений сеточной функции по вычислительным узлам – одномерная или ленточная схема, двухмерное или блочное разбиение или трехмерное разбиение узлов вычислительной сетки.

На этапе декомпозиции, когда производится разделение данных на блоки для построения параллельного алгоритма, каждому процессорному элементу вместе с выделенной сеточной подобластью распределялись все значения сеточной функции, принадлежащие этой подобласти. На этапе планирования коммуникаций, когда устанавливаются связи между блоками, расчеты в которых выполняются параллельно, из-за используемого шаблона явной разностной схемы для вычисления очередного приближения в приграничных узлах каждой подобласти потребовались значения сеточной функции с соседнего граничащего процессорного элемента. Для этого на каждом процессорном элементе создавались фиктивные ячейки для хранения данных с соседнего процессорного элемента и организовывались пересылки этих граничных значений, необходимых для обеспечения однородности вычислений.

Сравнение различных способов распараллеливания рассматриваемого явного алгоритма решения нестационарных уравнений Навье-Стокса с целью отыскания оптимального с точки зрения минимизации затрат на пересылку данных было проведено на примере одного адвективно-диффузионного уравнения.

Предварительный теоретический анализ эффективности различных способов декомпозиции расчетной области для рассматриваемого случая показал, что при использовании более 11 процессорных элементов для вычислений в случае 3D-декомпозиции потребуется пересылать между процессорными элементами меньшее количество сеточных значений функции, и, как следствие, можно ожидать, что в этом случае затрачиваемое на пересылку время будет

минимально. Несмотря на это, вычислительные эксперименты (проведенные на кластере СКИФ Cyberia) позволили установить, что при числе используемых процессорных элементов до 255 лучших результатов можно достичь, используя 2D декомпозицию за счет сохранения последовательного доступа к данным в оперативной памяти.

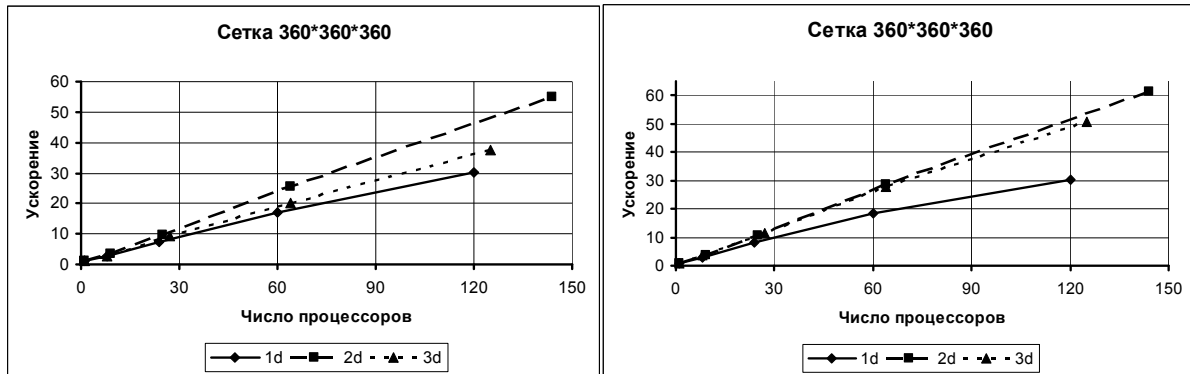


Рисунок 2 – Ускорение для различных способов декомпозиции расчетной области: слева – до оптимизации, справа – после оптимизации

Анализ полученных результатов показал, что при написании параллельных программ целесообразно использовать «динамические» массивы с подстраиваемыми под выделенное число процессорных элементов размерами. В этом случае прирост производительности для 2D-декомпозиции составил 6-8 %, а для 3D-декомпозиции около 14 % (рисунок 2).

Также представлены особенности параллельной реализации методов, выбранных для решения системы линейных алгебраических уравнений разностной задачи для определения поправки давления, и описываются результаты, полученные при сравнении этих методов. Сравнение осуществлялось на примере численного решения эллиптического уравнения в единичном кубе с граничными условиями Дирихле на одной границе ($x_1 = 1$) и условиями Неймана на остальных границах.

Результаты сравнения показали, что для задач большой размерности только метод Зейделя с красно-черным упорядочиванием при распараллеливании целиком повторяет процесс сходимости последовательного алгоритма, что выражается в сохранении количества итераций, требующихся для сходимости метода, вне зависимости от числа использованных процессорных элементов и способа декомпозиции. Важно отметить, что рассматриваемая реализация алгоритма очень хорошо масштабируется на любое разумное количество вычислительных узлов.

Параллельная реализация методов сопряженных и бисопряженных градиентов теоретически также не нарушает процесс сходимости последовательного алгоритма. Но на практике обнаружено, что количество итераций случайным образом меняется при различных способах декомпозиции. Численные эксперименты показали, что это является следствием некоммутативности в случае машинной арифметики вычисления суммы большего количества слагаемых (сбор частичных сумм скалярного произведения). Заметим, что сам итерационный

процесс в конце концов сходится, при этом лишь незначительно меняется получение последовательности приближений к решению.

Параллельный алгоритм метода Булеева для поставленной задачи работает корректно в том случае, если не используется разбиение области по оси Ox_1 и тем самым допускает использование лишь 1D и 2D-декомпозиции.

Таблица 1 – Время счета на разном количестве процессорных элементов

Метод \ Число процессорных элементов	1	9	25	64	144	225
Метод Зейделя	51756	15153	6054	2134	633	630
Метод Булева	60000	12393	5251	2539	1686	1567
Метод CG	483	136	41	12	3,9	3,6
Метод CG с пред-ем методом Зейделя	212	59	21	5,3	1,74	1,35
Метод BiCGStab с пред-ем методом Булева	152	47	20	-	-	-
Метод BiCGStab с пред-ем методом Зейделя	125	41	14,4	3,5	1,38	1,3

В таблице 1 приведено время в секундах (для 2D-декомпозиции и разностной сетки $120 \times 120 \times 120$), требующееся для сходимости рассматриваемых методов к решению с заданной точностью (вычисления выполнялись с точностью 10^{-5} , контроль сходимости метода выполнялся по норме ошибки и невязки) и показано, что методы сопряженных направлений на два порядка более эффективны при решении предложенной для тестирования задачи.

Методы Зейделя с красно-черным упорядочиванием и Булеева сходятся к решению более равномерно, но требуют значительного количества итераций: 306117 – метод Булеева и 421458 – метод Зейделя. Метод сопряженных градиентов также сходится равномерно и монотонно, но за меньшее количество итераций 3683. Сходимость предобусловленных методов не является монотонной, но количество итераций сокращается на несколько порядков, так предобусловленные методом Зейделя методы CG и BiCGStab сходятся за 217 и 100 итераций соответственно. Метод BiCGStab с предобуславливанием по Булееву сходится за 271 итераций при расчете на одном процессорном элементе. Также отмечается, что количество итераций для сходимости метода Булеева увеличивается на 35 % при увеличении количества процессорных элементов до 225.

На основе полученных результатов для методов решения систем линейных алгебраических уравнений сделан вывод, что более эффективными с точки зрения ускорения и скорости сходимости являются методы сопряженных направлений. При этом выбор используемого метода должен определяться поставленной задачей. Так наиболее предпочтительным вариантом для рассматриваемой во второй главе задачи является метод сопряженных градиентов с предобуславливанием методом Зейделя с красно-черным упорядочиванием.

Также отмечается, что метод Зейделя с красно-черным упорядочиванием может быть использован для решения системы уравнений для поправок давления, при этом данный метод является наиболее надежным с точки зрения оценки влияния количества используемых процессорных элементов и сложности рассматриваемой задачи на результаты расчетов.

Таблица 2 – Время счета (2D-декомпозиция) для случая моделирования ламинарного течения в канале на сетке 120x120x30

Число процессов	1	4	16	25	64	100
Время счета	464	280	34	13	10	9

В таблице 2 представлено время работы (в секундах) параллельной программы для различного количества процессорных элементов используемых при решении уравнений Навье-Стокса для ламинарного течения в канале (30 шагов по времени).

В пятой главе приводятся результаты тестирования построенной вихре-разрешающей модели на следующих задачах: течение в канале, обтекание цилиндра квадратного сечения. Результаты моделирования течения жидкости в канале при турбулентном числе Рейнольдса $Re_\tau = 180$ ($Re_\tau = u_* h / \nu$, u_* – динамическая скорость, h – полуширина канала) с использованием динамической модели вихревой вязкости показали хорошее согласование с экспериментальными данными⁶ и данным прямого численного моделирования⁷ (рисунок 3).

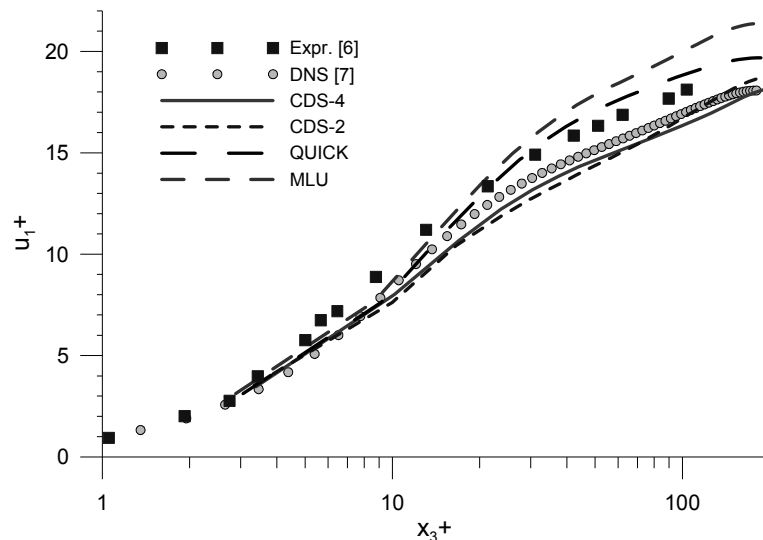


Рисунок 3 – Профиль осредненной по времени продольной компоненты скорости

Для случая обтекания цилиндра квадратного сечения выбор области исследования и значение числа Рейнольдса $Re = U_{in} D / \nu$ соответствовали эксперименту⁸. Для расчетов использовалась сетка $Nx_1 \times Nx_2 \times Nx_3 = 132 \times 126 \times 42$. Движение жидкости поддерживалось за счет задания постоянной скорости на входной границе. В качестве начальных данных использовались постоянные значения скорости $\bar{u}_1 = U_{in} = 0.55 \text{ м/с}$, $\bar{u}_2 = \bar{u}_3 = 0$. Расчеты (и осреднение величин) проводились в течение двенадцати периодов отрыва вихря после времени инициализации, равного $50D/U_{in}$, D – диаметр цилиндра.

⁶ Niederschulte M.A., Adrian R.J., Hanratty T.J. Measurements of turbulent flow in a channel at low Reynolds numbers // Experiments in Fluids. 1990. Vol. 9. P. 222–230.

⁷ Kim J., Moin P., Moser R. Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number // Journal of Fluid Mechanics. 1987. Vol. 177. P. 133–166.

⁸ A laser-Doppler velocimetry study of ensemble averaged characteristics of the turbulent near wake of a square cylinder / D. Lyn [et al.] // J. Fluid Mech. 1995. Vol. 304. P. 285–319.

Эксперимент использовался для апробации построенной модели турбулентности. Показано, что набегающий ламинарный поток рассеивается на наветренной стороне цилиндра, а с боковых поверхностей отрываются вихри. Экспериментально установленная частота отрыва вихрей f соответствует значению безразмерного числа Струхала $Sh = fD/U_{in} = 0.13$. Такое же значение частоты отрыва вихрей получено численно в результате расчетов. Вычислительный эксперимент обтекания цилиндра квадратного сечения показал хороший уровень согласования с экспериментальными данными. Профиль компоненты скорости $\langle \bar{u}_1 \rangle$, осредненной по пространству и времени, хорошо соответствует данным измерений. На рисунке 4 представлены результаты расчетов изменения осредненной по времени продольной скорости потока и турбулентные напряжения для пульсаций скорости $\langle \overline{u_2'^2} \rangle$ вдоль оси, ориентированной по потоку и проходящей через середину поперечной плоскости расчетной области. Для моделирования подсеточных масштабов использовались модель Смагоринского или динамическое замыкание Германо.

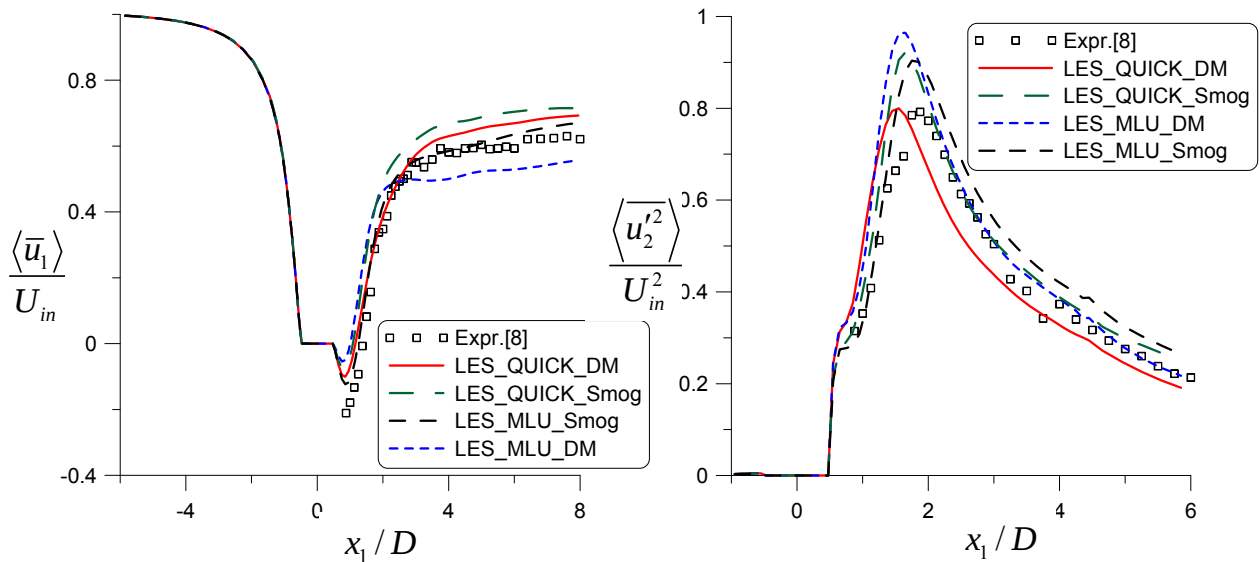


Рисунок 4 – Сравнение профиля средней скорости $\langle \bar{u}_1 \rangle$ при использовании различных подсеточных моделей и схем аппроксимации конвективных слагаемых – (слева), турбулентные напряжения для пульсаций скорости $\langle \overline{u_2'^2} \rangle$ – (справа), $\langle \rangle$ – осреднение по времени

Сравнение результатов (рисунок 4) показывает, что схема MLU Ван Лира вносит свой вклад в подсеточное моделирование и позволяет достичь довольно точного согласования результатов численного эксперимента с измерениями для средних характеристик потока при использовании замыкания Смагоринского с постоянным коэффициентом $C_s = 0.13$. Однако лучшие результаты получаются при использовании направленной схемы QUICK для аппроксимации конвективных слагаемых в сочетании с динамическим замыканием для подсеточного моделирования (с осреднением вдоль однородных направлений).

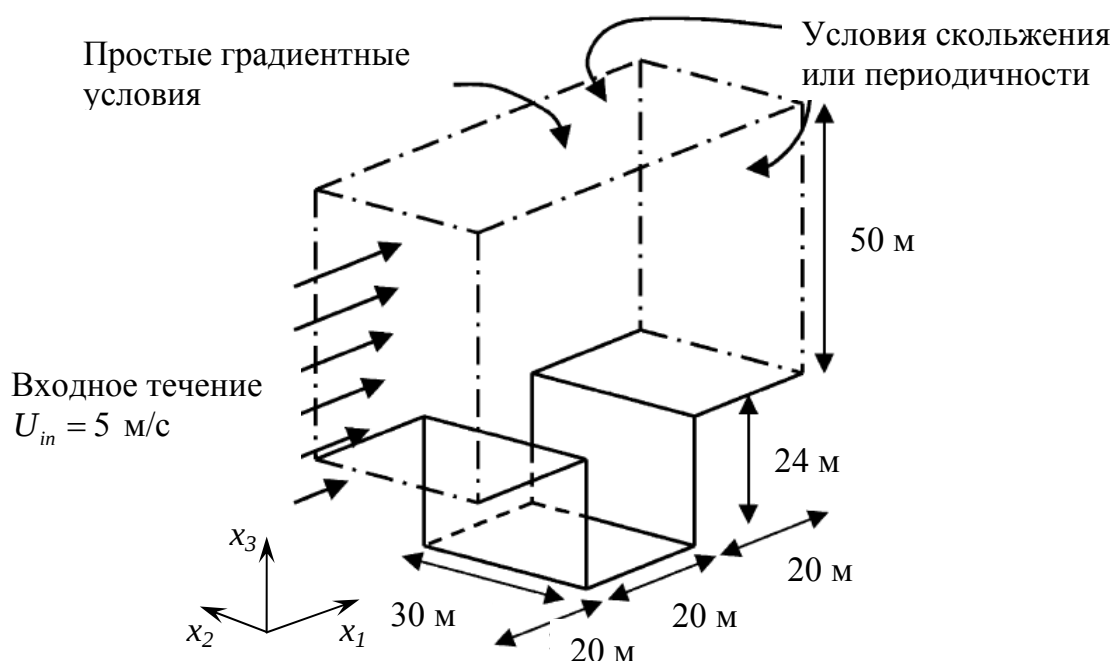


Рисунок 5 – Расчетная область для случая уличного каньона

На основе построенной математической модели турбулентного течения несжимаемой среды для трехмерной модели уличного каньона проведен ряд расчетов. В поперечном направлении использовались условия скольжения или периодичности. В обоих случаях необходимо иметь определенное количество точек, для того, чтобы длина области в поперечном направлении была больше чем размер самого большого вихря в каньоне. Периодические граничные условия задавались в продольном направлении с целью имитировать бесконечную серию каньонов. Расчеты проводились на сетке $182 \times 54 \times 180$. Источник поступления примеси постоянной интенсивности располагался вблизи поверхности на высоте $h_{x_3} = 0,125$ м. Расчеты (и осреднение величин) проводились в течение 240 с после времени инициализации, равного 200 с и определяемого по аналогии с примером обтекания цилиндра $50H/U_{in}$, H – высота каньона.

Результаты расчетов показывают, что максимальные концентрации примеси наблюдаются у подветренной стороны каньона и вблизи источников примеси (рисунок 6). При перемещении источника примеси к наветренной стороне возрастают максимальные концентрации примеси. Это обусловлено увеличением расстояния, которое преодолевает примесь до выхода за пределы уличного каньона, так как с увеличением этого расстояния возрастает степень рассеяния примеси за счет турбулентной диффузии. С другой стороны, когда источник примеси располагается у подветренной стороны уличного каньона, примесь рассеивается менее интенсивно и в большей степени выносится потоком из уличного каньона.

На основе численных экспериментов показано, что увеличение скорости основного потока способствует более интенсивному выносу примеси из уличного каньона. Также показано, как геометрические параметры уличного каньона влияют на вид течения и уровень загрязнения. Так, в случае уменьшения высоты уличного каньона H или увеличения ширины W до соотношения

$H/W = 0,5$ центр основного вихря смещается к наветренному заданию и растягивается во всю длину канала (рисунок 6). Это приводит к уменьшению скорости вращательного движения воздушных масс у подветренной стороны каньона и как следствие, примесь менее интенсивно выносится из каньона и возрастают локальные значения концентрации примеси. Дальнейшее увеличение расстояния между зданиями $H/W = 0,125$ приводит к образованию двух рециркуляционных зон: большой вихрь у подветренной стороны и малый у наветренной.

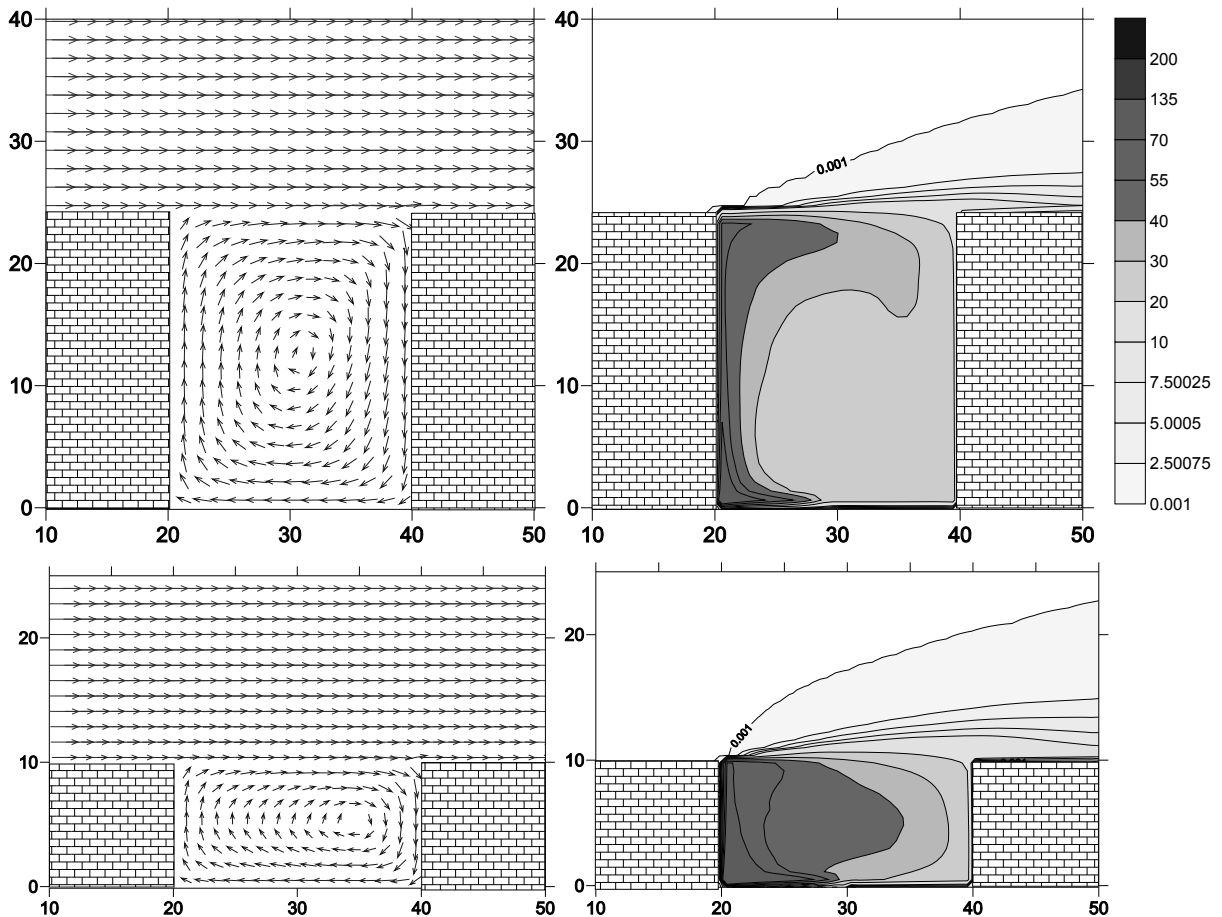


Рисунок 6 – Векторное поле скорости, изолинии концентрации примеси, осредненной вдоль оси Ox_2 , $U_{in} = 5$ м/с; источник примеси в точке ($x_1 = 30$ м, $x_2 = 15$ м, $x_3 = 0.125$ м)

Проведено исследование турбулентного движения воздушных масс и распределения выбросов от автотранспорта для участка городской застройки для случая, описанного в работе⁹ где моделирование турбулентного течения в области городской застройки осуществлялось на основе RANS-подхода. Показано, что разработанная модель также фиксирует максимумы концентрации примеси вдоль дорог и за высотными зданиями вниз по потоку и дает более точную и подробную информацию о структуре турбулентного течения для исследуемой области.

В **заключении** сформулированы основные выводы по результатам диссертационного исследования.

⁹ Нутерман Р.Б., Бакланов А.А., Старченко А.В. Моделирование аэродинамики и распространения выбросов от автотранспорта в городском подслое // Математическое моделирование. 2010. Т. 22, № 4. С. 3–22.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Данилкин Е.А. Параллельная реализация численного метода решения системы уравнений Навье-Стокса при моделировании крупных вихрей турбулентных течений / Е.А. Данилкин, А.В. Старченко // Вестник Новосибирского государственного университета. Сер. Информационные технологии. – 2009. – Т. 7, № 2. – С. 49–61.
2. Данилкин Е.А. Моделирование турбулентных течений за плохообтекаемыми телами с использованием многопроцессорной вычислительной техники / Е.А. Данилкин // Научный сервис в сети Интернет: масштабируемость, параллельность, эффективность : труды Всероссийской суперкомпьютерной конференции. – М. : Изд-во МГУ, 2009. – С. 192–201.
3. Данилкин Е.А. Моделирование турбулентных течений и теплообмена за плохообтекаемыми телами с использованием метода крупных вихрей / Е.А. Данилкин, А.В. Старченко // Теплофизические основы энергетических технологий. – Томск : Изд-во Том. политех. ун-та. 2009. – С. 60–68.
4. Данилкин Е.А. К вопросу об эффективности 3D-декомпозиции при численном решении уравнения переноса с использованием МВС с распределенной памятью / Е.А. Данилкин // Вестник ТГУ. Механика и математика. – 2008. – № 2 (3). – С. 39–46.
5. Данилкин Е.А. Вихреразрешающее моделирование турбулентности с использованием многопроцессорных вычислительных систем с распределенной памятью / Е.А. Данилкин, А.В. Старченко // Телематика 2008 : труды XV Всероссийской научно-методической конференции. – СПб., 2008. – С. 118.
6. Данилкин Е.А. Сравнение различных способов декомпозиции сеточной области при численном решении уравнения переноса / Е.А. Данилкин, А.В. Старченко // Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах : труды 8-й Международной конференции. – Казань : Изд-во КГТУ, 2008. – С. 300–305.
7. Данилкин Е.А. Численное решение систем связанных нелинейных дифференциальных уравнений на многопроцессорной технике с распределенной памятью / Е.А. Данилкин, А.В. Старченко // Материалы XV международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам. – М. : Вузовская книга, 2007. – С. 201–203.
8. Данилкин Е.А. К выбору способа декомпозиции при численном решении систем связанных дифференциальных уравнений на многопроцессорной технике с распределенной памятью / Е.А. Данилкин, А.В. Старченко // Третья Сибирская школа-семинар по параллельным вычислениям. – Томск : Изд-во Том. гос. ун-та, 2006. – С. 95–101.

Тираж 100 экз.

Отпечатано в ООО «Позитив-НБ»
634050 г. Томск, пр. Ленина 34а