

ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩЕЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИСТЕНОЧНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОПРОЦЕССОРНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Е.А. Данилкин, А.В. Старченко

В работе представлено сравнение нескольких схем аппроксимации конвективных слагаемых при моделировании турбулентного течения в плоском канале с использованием вихреразрешающей модели турбулентности. Проведено сравнение различных способов геометрической декомпозиции данных при численном решении дифференциальных уравнений описывающих изучаемые процессы, о также исследовано влияние использования технологии опережающей пересылки на эффективность параллельной реализации.

Введение

С ростом производительности современной высокопроизводительной вычислительной техники все большее распространение получает вихреразрешающее моделирование турбулентности. В основе данного подхода лежит фильтрация уравнений неразрывности и Навье-Стокса, позволяющая явно разрешать крупные вихри турбулентных течений, в то время как мелкомасштабная (подсеточная) турбулентность параметризуется той или иной подсеточной моделью.

Исследования показывают, что вихреразрешающее моделирование дает хорошие результаты при решении нестационарных задач обтекания различных конструкций, а также при моделировании струйных течений. В данной работе исследуется поведение вихреразрешающей модели при описании генерации энергии турбулентности за счет взаимодействия потока с ограничивающей поверхностью. Работа призвана продемонстрировать насколько успешно построенная модель воспроизводит процессы, происходящие в пограничном слое.

Вихреразрешающее моделирование предъявляет достаточно жесткие требования к быстродействию ЭВМ, поэтому требуется применение высокопроизводительных вычислительных систем. В работе делается упор на использование многопроцессорной вычислительной техники с распределенной памятью.

Постановка задачи

Математическая модель трехмерного нестационарного турбулентного движения несжимаемой среды включает в себя отфильтрованные уравнения неразрывности и Навье-Стокса, записанные относительно размерных переменных :

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}, i=1,2,3, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = 0, \quad (2)$$

Здесь $\bar{u}_i = \bar{u}_i(\vec{x}, t)$ - отфильтрованные проекции мгновенного вектора скорости на оси координат Ox_i ; \bar{p} - мгновенное значение давления; ν - кинематическая вязкость; ρ - плотность; T_{ij} - тензор подсеточных напряжений. По повторяющемуся индексу j проводится суммирование.

Из-за наличия в системе уравнений (1)–(2) слагаемых T_{ij} она является незамкнутой, для ее замыкания использовалась динамическая модель [1] (Dynamic Model, DM), в которой коэффициент турбулентной вязкости подбирается исходя из анализа информации, содержащейся в численно разрешаемых масштабах движения, и является величиной зависящей от пространственных координат и времени.

Граничные условия

Поскольку при решении практически важных задач пространственное разрешение часто не позволяет описывать процессы в вязком приповерхностном слое, то суммарное воздействие мелкомасштабных неоднородностей стенки должно быть учтено при помощи той или иной пристеночной модели. Известно, что в зоне развитой турбулентности изменение продольной компоненты скорости в зависимости от расстояния от поверхности можно с хорошей точностью аппроксимировать логарифмической зависимостью. Поэтому в данной работе для правильного описания поведения средних величин использовалась простейшая пристеночная модель, не выходящая за пределы первого расчетного слоя.

Аппроксимация и метод решения

Аппроксимация представленной выше дифференциальной задачи осуществляется на основе метода конечного объема. Значения компонент скорости определяются на гранях конечных объемов, а скалярные характеристики – в центре. Аппроксимация конвективных членов уравнения переноса выполнялась с

использованием одной из четырех схем: противопотоковой схемы MLU Ван Лира [2], схемы Леонарда QUICK [3], центрально-разностной схемы второго или четвертого порядка; для аппроксимации диффузионных членов использовалась центрально-разностная схема второго порядка точности. 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 удовлетворяющего уравнению неразрывности на новом временном слое выполнялась на основе решения разностного уравнение для давления. Решение разностного уравнения для давления осуществлялось методом сопряженных градиентов (CG) с предобуславливанием на основе метода Зейделя с красно-черным упорядочиванием.

Параллельная реализация

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.

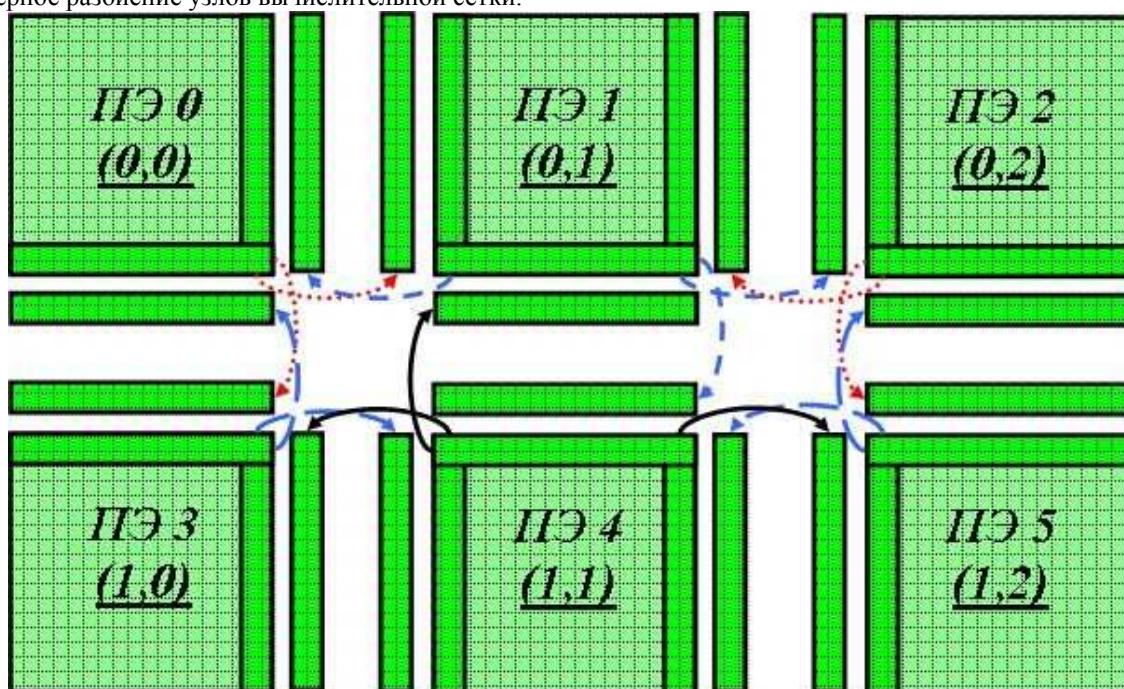


Рис. 1. Иллюстрация организации пересылок граничных сеточных значений при 2D-декомпозиции для обеспечения однородности вычислительного процесса

После распределения данных по процессорным элементам (ПЭ) устанавливаются связи между блоками, расчеты в которых выполняются параллельно. Связи возникают в силу используемого шаблона явной разностной схемы, поскольку для вычисления очередного приближения в приграничных узлах каждой подобласти требуются значения сеточной функции с соседнего процессорного элемента. Поэтому на каждом процессорном элементе создаются фиктивные ячейки для хранения данных с соседнего процессорного элемента и организовывается пересылка этих граничных значений, необходимых для обеспечения однородности вычислительного процесса (рисунок 1).

Время, затрачиваемое на пересылку данных (рисунок 1) при организации обменов, можно уменьшить, используя технологию опережающей рассылки, когда вычисления во внутренней области проходят на фоне пересылки уже вычисленных граничных значений сеточной функции. Также прирост эффективности можно повысить за счет правильного выбора способа декомпозиции сеточной области. Так для рассматриваемого класса задач показано, что параллельная реализация вычислительного алгоритма, использующая двумерную геометрическую декомпозицию сеточной области исследования, и применение динамических массивов, позволяю повысить эффективность на 8-10 % [4].

Таблица 1 – Время счета (2D-декомпозиция) для случая моделирования течения в канале на сетке 120x120x30

Число процессоров	1	4	16	25	64	100
-------------------	---	---	----	----	----	-----

Время счета, час	3,868	2,334	0,286	0,112	0,083	0,081
------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Использование многопроцессорной вычислительной техники позволило сократить время вычислений при решении описанного класса задач с нескольких недель до суток или часов в зависимости от размера исследуемой области. В таблице 1 представлено время работы (в часах) параллельной программы для различного количества процессорных элементов используемых при решении уравнений Навье-Стокса для течения в канале (1000 шагов по времени). Заметим, что при проведении вычислений для турбулентных течений требуется около 100 000 – 500 000 шагов по времени.

Турбулентное течение в канале

Оценка корректности работы подсеточной модели и предложенных схем аппроксимации конвективных слагаемых была проведена на задаче исследования турбулентного течения в плоском канале при низких числах Рейнольдса.

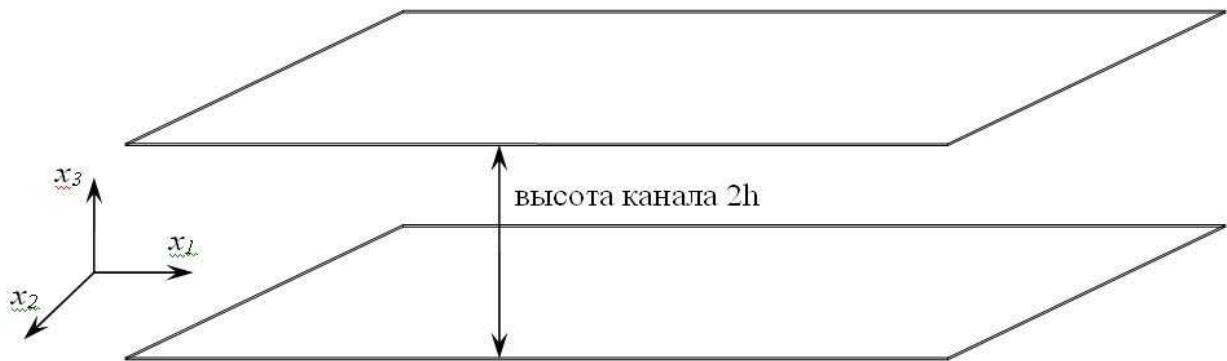


Рис. 2. Схематическое представление канала

Геометрия расчетной области представлена на рисунке 2. Граничные условия задавались следующим образом: по направлению потока – условия периодичности с сохранением расхода, на открытых боковых поверхностях – условия скольжения, на верхней и нижней образующих канала – условия прилипания. Использовалась динамическая модель с осреднением вдоль однородных направлений. Для задания начальных условий выбраны аналитические выражения, предложенные в работе [5] для трех компонент скорости.

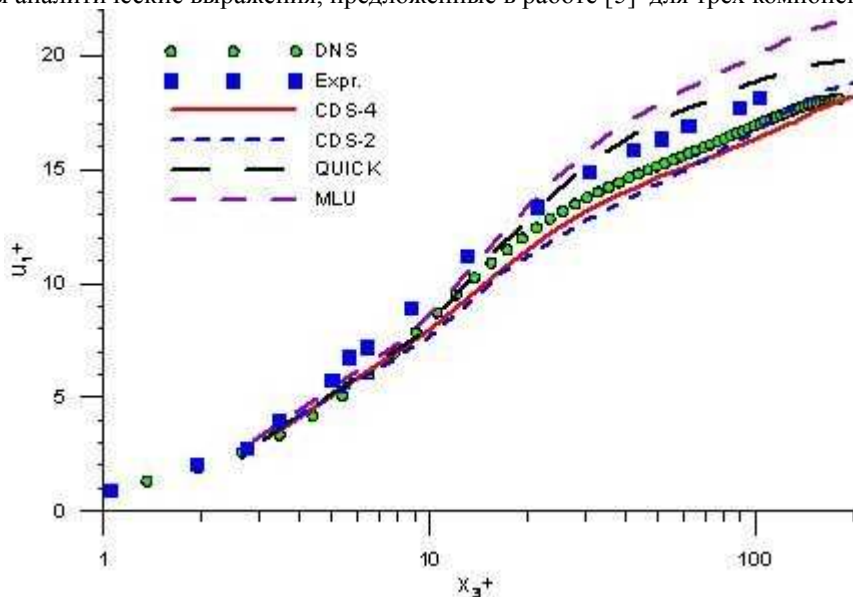


Рис. 3. Профиль средней скорости в продольном направлении

Результаты сравнения с прямым численным моделированием [6] и экспериментальными данными [7] показывают, что использование консервативной центрально-разностной схемы второго или четвертого порядка точности позволяет довольно точно описывать профиль продольной компоненты скорости, при этом результаты хорошо накладываются на данные прямого численного моделирования. В тоже время использование противопотоковой схемы QUICK второго порядка дает результат наиболее близкий к экспериментальным данным. Применение противопотоковой схемы MLU приводит к некоторому завышению значений продольной компоненты скорости (рисунок 3).

На рисунке 4 представлены среднеквадратичные флуктуации продольной компоненты скорости для

расчетов с применением четырех схем аппроксимации конвективных слагаемых: центрально-разностной второго порядка (CDS-2), центрально-разностной четвертого порядка (CDS-4), направленной схемы QUICK и противопотоковой схемы MLU.

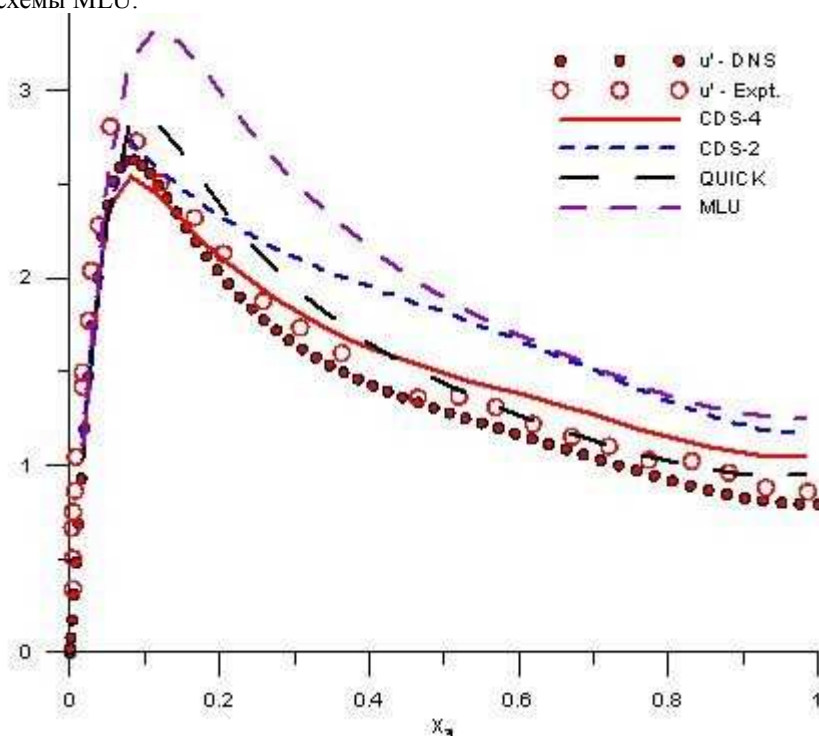


Рис. 4. Флуктуации продольной компоненты скорости

Из рисунка 4 видно, что результаты, полученные при использовании центрально-разностной схемы второго или четвертого порядка хорошо согласуются с результатами прямого численного моделирования [6] и экспериментальными данными [7] в области вблизи стенки и позволяют довольно точно предсказывать точку наблюдаемого максимума пульсаций скорости. Также необходимо отметить, что в ядре потока более точные результаты дает схема QUICK, а завышение уровня флуктуаций в ядре потока при использовании центрально-разностной схемы, по-видимому вызвано возникающими осцилляциями в совокупности с уменьшением динамического коэффициента Смагоринского в этой области почти до нуля.

Заключение

1. На задаче турбулентного течения в канале на основе вычислительного эксперимента показано, что для корректного расчета параметров потока и его турбулентной структуры с помощью используемой вихреразрешающей модели лучшие результаты показывает применение противопотоковой схемы QUICK Леонарда для аппроксимации конвективных членов по сравнению с центрально-разностными схемами или противопотоковой схемой MLU.

2. Показано, что использование неблокирующих пересылок в сочетании с правильным выбором способа геометрической декомпозиции позволяет за приемлемое время решать вычислительно сложные задачи с использованием вихреразрешающего моделирования.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Germano M. A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model / M. Germano, U. Piomelli, P. Moin, W. H. Cabot // *Phys. Fluids. A.* – 1991. – Vol. 3. – P. 1760–1765.
2. 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.
3. Leonard B. A Stable and Accurate Convective Modeling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation / B. Leonard // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering.* – 1979. – Vol. 19. – P. 59–98.
4. 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. Серия: Информационные технологии.* – 2009. – Т. 7, № 2, – С. 49–61.
5. Gokarn A. Large eddy simulations of incompressible turbulent flows using parallel computing techniques / A. Gokarn, F. Battaglia, R.O. Fox // *Int. J. Numer. Meth. Fluids.* – 2008. – Vol. 56. – № 10. – P. 1819–1843.

6. Kim J. Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number / J. Kim, P. Moin, R. Moser // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1987. – Vol. 177. – P. 133–166.
7. Niederschulte M.A. Measurements of turbulent flow in a channel at low Reynolds numbers / M.A. Niederschulte, R.J. Adrian, T.J. Hanratty // *Experiments in Fluids*. – 1990. Vol. 9. – P. 222–230.