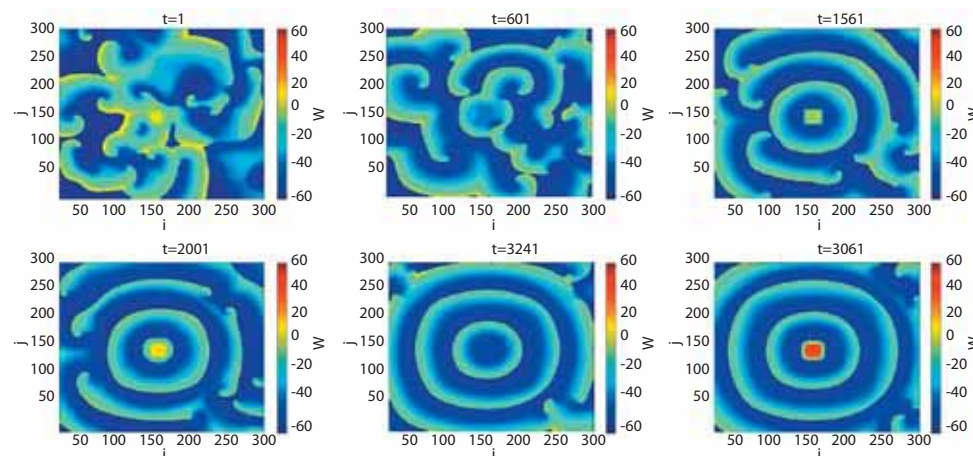


способ внешнего стимулирования с помощью высокочастотного локально прикладываемого электрического сигнала будет основным в создаваемом в настоящее время имплантируемом программируемом дефибрилляторе.



**Рис. 4.** Вытеснение спирального хаоса из сердечной мышцы с помощью локализованного слабого внешнего периодического воздействия

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Luo C.-H., Rudy Y. A model of the ventricular cardiac action potential: De-polarization, repolarization, and their interaction // *Circ. Res.* 1991. V. 68. P. 1501.
2. Petrov V.S., Osipov G.V., Suykens J.A.K. Passive elements influence on the dynamics of oscillatory ensembles // *Physical Review E.* 2009. V. 79. P. 046219.
3. Kryukov A.K., Petrov V.S., Averyanova L.S., Osipov G.V., Chen W., Drugova O., Chan C.K. Synchronization phenomena in mixed media of passive, excitable and oscillatory cells // *Chaos.* 2008. V. 18. P. 037129.
4. Qu Z., Weiss J.N., Garfinkel A. Cardiac electrical restitution properties and stability of reentrant spiral waves: a simulation study // *J Physiol.* 1999. V. 276. P. 69.

## Вихреразрешающее моделирование турбулентных течений и переноса примеси в уличных каньонах с использованием многопроцессорной вычислительной техники



## 6 Вихреразрешающее моделирование турбулентных течений и переноса примеси в уличных каньонах с использованием многопроцессорной вычислительной техники

В статье представлена информация о разрабатываемой в Томском государственном университете вихреразрешающей модели турбулентности для описания отрывных течений и переноса примеси в уличных каньонах и элементах городской застройки. Коротко описаны параллельная версия вычислительного алгоритма, технология организации вычислений и некоторые результаты математического моделирования.

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, и некоторые из них напрямую связаны с качеством атмосферного воздуха. Для понимания аэродинамических процессов, происходящих в городской застройке вблизи дорог и точечных источников примеси, 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, тем не менее он дает низкую точность при описании нестационарных турбулентных течений вблизи плохобтекаемых 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 (вихреразрешающее моделирование) 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. Однако широкое применение LES-подхода для исследования течений в окружающей среде сдерживается высокими требованиями к вычислительным ресурсам компьютерной техники при численной реализации вихреразрешающих моделей.

Поэтому в настоящее время необходима разработка новых эффективных параллельных методов численного решения нелинейных задач математической

### АВТОРЫ:

**А.В. Старченко** – докт. физ.-мат. наук, зав. кафедрой, Томский государственный университет;  
e-mail: starch@math.tsu.ru

**Е.А. Данилкин** – канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотрудник, Томский государственный университет;  
e-mail: ugin@math.tsu.ru



физики, ориентированных на использование многопроцессорных вычислительных систем с распределенной памятью, так как на современном этапе развития вычислительной техники большинство супер-ЭВМ, которыми мы располагаем, построены именно по такому принципу.

В случае моделирования атмосферных процессов под математической моделью подразумевается система дифференциальных уравнений в частных производных с граничными и начальными условиями. Численное решение такой системы дифференциальных уравнений ищется методом конечного объема. 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. Разбив таким образом расчетную область, каждое уравнение математической модели интегрируется по каждому конечному объему. В результате приближенного интегрирования получается дискретный аналог системы дифференциальных уравнений — система линейных алгебраических уравнений сверхбольшого размера (более 10<sup>9</sup> уравнений).

При решении полученной системы линейных алгебраических уравнений использовался принцип геометрической декомпозиции (рис. 1), когда каждый процессорный элемент производит вычисления в выделенной ему сеточной подобласти. Другими словами, вся вычислительная работа распределяется между имеющимися в распоряжении процессорными элементами с условием обеспечения обмена приграничными значениями для обеспечения однородности вычислений.

При использовании параллельных компьютеров с распределенной памятью первым по значимости является вопрос о возможности проведения параллельных вычислений для конкретной решаемой задачи. Речь идет о пересмотре взглядов на стандартные алгоритмы, поскольку некоторые из них становятся неприменимыми при значительном увеличении числа процессоров, другие, наоборот, приобретают большое значение. Второй по важности вопрос касается эффективности использования имеющихся вычислительных ресурсов и возможности масштабирования разработанного численного алгоритма на большое количество процессорных элементов. Важно, чтобы построенный алгоритм эффективно работал как на десяти процессорных элементах, так и на ста.

Время, затрачиваемое на пересылку данных (рис. 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. Прирост эффективности можно

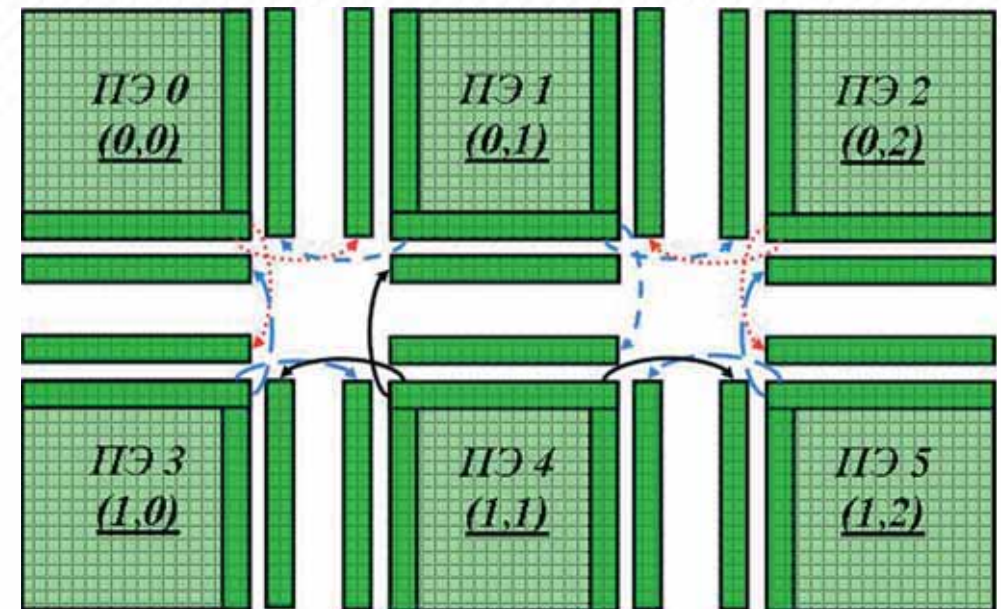


Рис. 1. Иллюстрация организации пересылок граничных сеточных значений при 2D-декомпозиции для обеспечения однородности вычислительного процесса

также 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 динамические массивы, позволяет повысить эффективность на 8–10 %.

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 представлено время работы 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.

Таблица 1

Время счета (2D-декомпозиция) для случая моделирования ламинарного течения в канале на сетке  $120 \times 120 \times 30$

Число процессов	1	4	16	25	64	100
Время счета, час	3,868	2,334	0,286	0,112	0,083	0,081

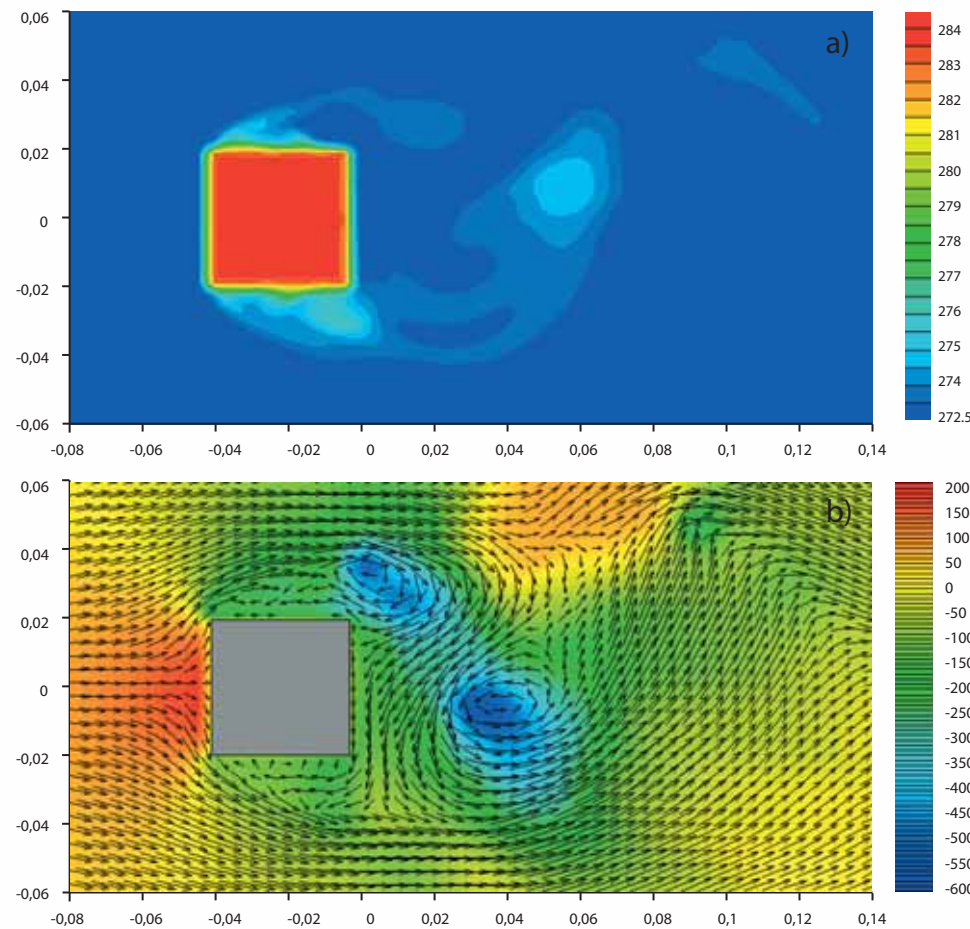


Рис. 2. Распределение температуры (а), векторное поле скорости и карта давления (б)

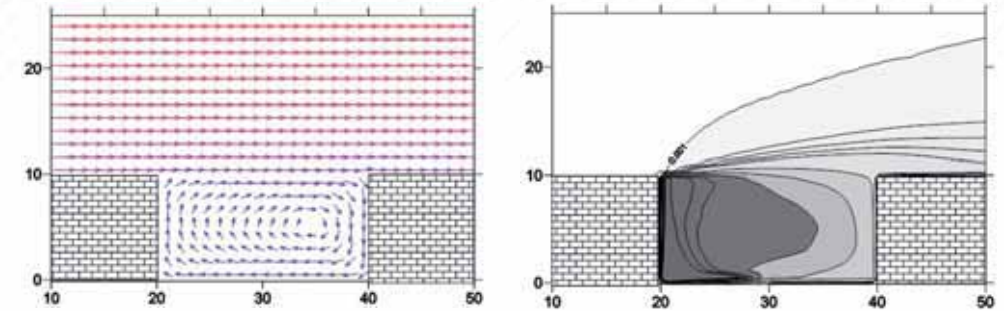


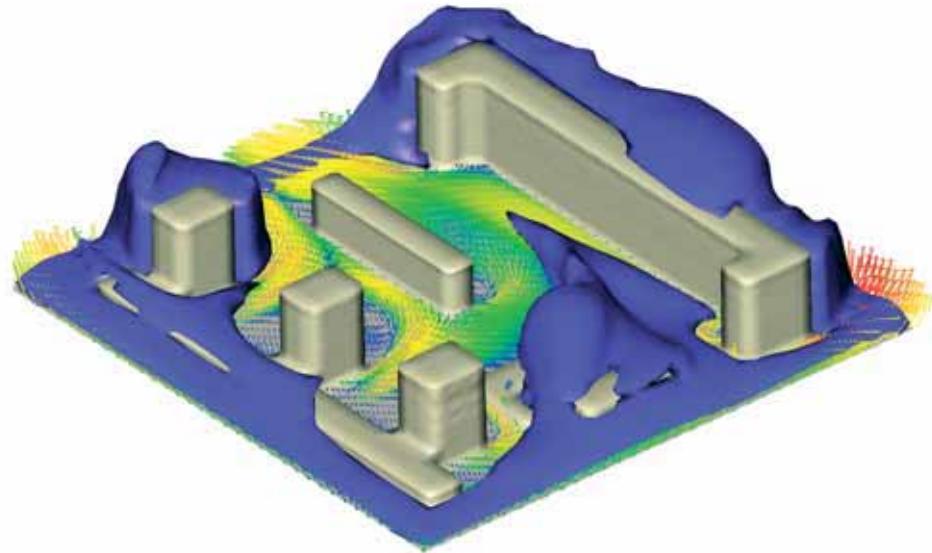
Рис. 3. Векторное поле скорости и изолинии концентрации примеси,  $U_{in}=5$  м/с, источник примеси располагается в точке  $(x=30\text{м}, y=15\text{м}, z=0,125\text{м})$

На рис. 2 представлена мгновенная картина распределения температуры вблизи нагретого цилиндра, иллюстрирующая, как тепло распространяется за счет турбулентного движения. Также на рисунке представлено векторное поле скорости на фоне поля давления. Результаты вычислительного эксперимента показали, что набегающий ламинарный поток рассеивается на наветренной стороне цилиндра, а с боковых поверхностей отрываются вихри, образующие дорожку Кармана за обтекаемым телом, что хорошо согласуется с данными наблюдений.

На основе построенной математической модели турбулентного течения несжимаемой среды для трехмерной модели уличного каньона проведено численное исследование влияния соотношения ширины и высоты уличного каньона, скорости потока воздуха на структуру течения и распространение концентрации примеси (рисунок 3).

Проведено также исследование распространения загрязнения от автотранспорта для участка реальной городской застройки. Получена картина турбулентного движения воздушных масс в городском квартале и распределения выхлопов от автотранспорта в виде изоповерхности концентрации примеси (рис. 4).





**Рис. 4.**  
Изоповерхность концентрации примеси для участка городской застройки на фоне векторного поля осредненной по времени скорости

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и программы Союзного государства "СКИФ-ГРИД".

## Мировой океан, изменения климата и суперкомпьютерное моделирование

