

Разработка и анализ микромасштабной метеорологической модели для исследования течений воздушных масс в городской застройке*

Р. Б. НУТЕРМАН, А. В. СТАРЧЕНКО

Томский государственный университет, Россия
e-mail: nutrik@math.tsu.ru, starch@math.tsu.ru

А. А. БАКЛАНОВ

Датский метеорологический институт, Копенгаген, Дания
e-mail: alb@dmi.dk

A microscale model for investigation of urban environment is developed. It is based on the $k-\varepsilon$ -model of turbulence. A comparison of the developed model, FLUENT CFD (Computational Fluid Dynamics) package, and the experiments is carried out. It is shown the model satisfactory predicts the structure of turbulent airflow.

Введение

В последние десятилетия загрязнение городского атмосферного воздуха — одна из основных причин ухудшения здоровья людей, проживающих на урбанизированных территориях. Многоэтажные здания представляют собой искусственные препятствия на пути движения воздушных масс и вызывают условия, при которых образуются застойные области даже при относительно высокой силе ветра. Измерения, выполненные в реальных масштабах городских улиц, эксперименты в аэродинамических трубах и математические модели обычно используются для исследования движения воздуха и переноса загрязнения внутри городского пограничного слоя [1–3]. Каждый из этих инструментов имеет свои достоинства и недостатки. Однако стоит отметить, что только математические модели позволяют предсказывать детальную картину движения воздушных масс, так как весьма затруднительно получить все многообразие свойств изучаемого течения при проведении натурных и экспериментальных исследований. Поэтому данные о характере движения воздуха и распространении примеси, полученные из натурных наблюдений и экспериментов, обычно используются для тестирования математических моделей и оценки степени их пригодности для всего спектра течений в городской застройке. В настоящее время существует ряд европейских проектов, направленных на разработку критериев качества и совершенствование микромасштабных метеорологических моделей, например COST 732 и TRAPOS [2]. В рамках этих проектов для валидации и анализа моделей специально отобраны данные измерений, полученные при

*Работа выполнена при финансовой поддержке INTAS (грант № 06-1000016-5928) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 07-05-01126).

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2008.

обтекании характерных для города препятствий, как в аэродинамических трубах, так и в реальных условиях.

Целью данного исследования является применение разработанной микромасштабной математической модели M2UE для изучения течения в условиях эксперимента [1].

1. Основные уравнения и методика численного решения

Трехмерная микромасштабная математическая модель M2UE (Microscale Model for Urban Environment) включает уравнения Рейнольдса, записанные с использованием замыкающих соотношений Буссинеска, и двухпараметрическую k — ε -модель турбулентности [4]. Теплофизические свойства принимаются постоянными. В таком случае основные дифференциальные уравнения системы можно записать в обобщенном виде:

$$\frac{\partial (U_j \Phi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right) + S_\Phi, \quad (1)$$

где j изменяется от 1 до 3 и используется соглашение о суммировании; U_j — средняя скорость; x_j — декартовы координаты. Источниковый член S_Φ , коэффициент диффузии Γ_Φ и переменная $\Phi = (U_1, U_2, U_3, k, \varepsilon, C)$ имеют соответствующий вид в зависимости от типа рассматриваемого уравнения. На входной границе, где поток поступает в область исследования, граничные условия выбираются в соответствии с данными наблюдений или экспериментов, а на выходе, верхней и боковых границах используются нулевые градиентные соотношения. Взаимодействие турбулентного потока с препятствиями и твердыми поверхностями учитывается в соответствии с методом пристенных функций Лаундера—Сполдинга [4], согласно которому касательная к поверхности компонента скорости вблизи поверхности представляется как

$$U_\tau = \frac{\tau_w}{\rho C_\mu^{1/4} \kappa k^{1/2}} \ln [EC_\mu^{1/4} k^{1/2} n / \nu],$$

где $C_\mu = 0.09$; $\kappa = 0.42$; $E = 9.0$; τ_w — трение на поверхности; ρ — плотность; ν — молекулярная вязкость; n — расстояние от обтекаемой поверхности.

Кинетическая энергия турбулентности k вблизи поверхности (в пристеночной ячейке разностной сетки) определяется из транспортного уравнения для k (1), при этом для генерации G и диссипации ε энергии турбулентности вблизи стенки используются следующие зависимости:

$$G = \nu_T \frac{|\tau_w|}{\rho (\kappa n)^2}, \quad \varepsilon = \frac{[k C_\mu^{1/2}]^{3/2}}{\kappa n}, \quad \nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}.$$

Задача решается численно на основе метода конечного объема [5]. Дискретизация дифференциальных уравнений осуществляется на неравномерной структурированной сетке. Для расчета интегралов используются кусочно-линейные профили, которые описывают изменение функции от одного узла разностной сетки к другому [7]. Конвективные члены транспортных уравнений аппроксимируются с использованием монотонизированной линейной противопотоковой схемы Ван Лира [6].

Такая дискретизация дифференциальных уравнений приводит к системе сеточных уравнений, решение которых построено на основе метода неполной факторизации Булева [8]. Для согласования полей скорости и давления используется процедура SIMPLE

Патанкара—Сполдинга [5]. Расчет параметров в областях со сложной геометрией осуществляется на основе метода фиктивных областей.

2. Результаты и обсуждение расчетов

Тестирование микромасштабной модели M2UE проводится на общем наборе данных MUST (Mock Urban Setting Trial), который используется в рамках проекта COST 732. Основные цели MUST-эксперимента — это моделирование реальной городской застройки и измерение поля ветра, турбулентных параметров и распространения примеси от точечного источника постоянной интенсивности при различных метеорологических условиях [1]. Геометрия расчетной области представляет собой перемасштабированную область размером 200×200 м с массивом контейнеров 10×12 , каждый из которых имеет размеры $12.2 \times 2.42 \times 2.54$ м. Один из контейнеров в пятом столбце (считая слева направо) и в шестой строке (считая снизу вверх) имеет размеры $6.1 \times 2.44 \times 3.51$ м (рис. 1). В набегающем потоке профиль скорости описывается следующим распределением: $U_{\text{ref}}(z/8.78)^{0.16}$, $U_{\text{ref}} = 5.5$ м/с. Кроме того, принимается, что на входе $k = 1.45$ м²/с², $\varepsilon = 0.2$ м²/с³. Рассматриваются два случая: поток движется вдоль оси Ox , что соответствует направлению 0° , а также под углом -45° (рис. 1). Сравнение расчетов гидродинамики с экспериментом приведено для случая 0° , а сравнение концентраций осуществляется для ориентации потока -45° . Жирными линиями на рисунке отмечены сечения, в которых представлены профили скорости, кинетической энергии (горизонтальная прямая) и концентрации примеси (две прямые под углом 45°).

Результаты расчетов показывают, что в рассматриваемом случае (направление потока 0°) образуются многочисленные области рециркуляционного движения в виде больших тороидальных вихрей за контейнерами и меньших по размеру — перед препятствиями. Скорость рециркуляционного потока в моделируемой городской застройке существенно ниже скорости воздуха над контейнерами (рис. 2 и 3), что, несомненно, может способствовать образованию повышенного уровня содержания примеси с подветренной стороны обдуваемых препятствий. Максимальное значение кинетической энергии турбулентности зафиксировано над крышкой контейнера перед его фронтальной гранью (см. рис. 2). Важно также отметить, что геометрические параметры контейнеров оказывают существенное влияние на характер течения, т. е. изменяется вихревая и турбулентная структура потока (см. рис. 3), уменьшаются или увеличиваются зоны рециркуляционного течения. Кроме того, нерегулярность рассматриваемой геометрии в центральной ее части приводит к повышению уровня кинетической энергии турбулентности перед самым высоким контейнером среди всего массива контейнеров.

Для того чтобы оценить качество предложенной модели, экспериментальные данные сравнивались с результатами расчетов по подобной модели для рассматриваемой геометрии с помощью пакета вычислительной гидродинамики FLUENT. В качестве модели турбулентности в пакете FLUENT выбрана k — ε -модель, а также использован стандартный метод пристенных функций [4]. Расчеты выполнялись на блочно-структурированной сетке. Дискретизация конвективных членов для уравнения Навье—Стокса осуществлялась на основе схемы MUSCUL (Monotone Upstream-Centered Schemes for Conservation Laws) [9], а для модели турбулентности использовалась противопотоковая схема второго порядка.

Результаты сравнения двух численных моделей и экспериментальных данных говорят об удовлетворительном качестве разработанной модели (рис. 4 и 5). Как видно

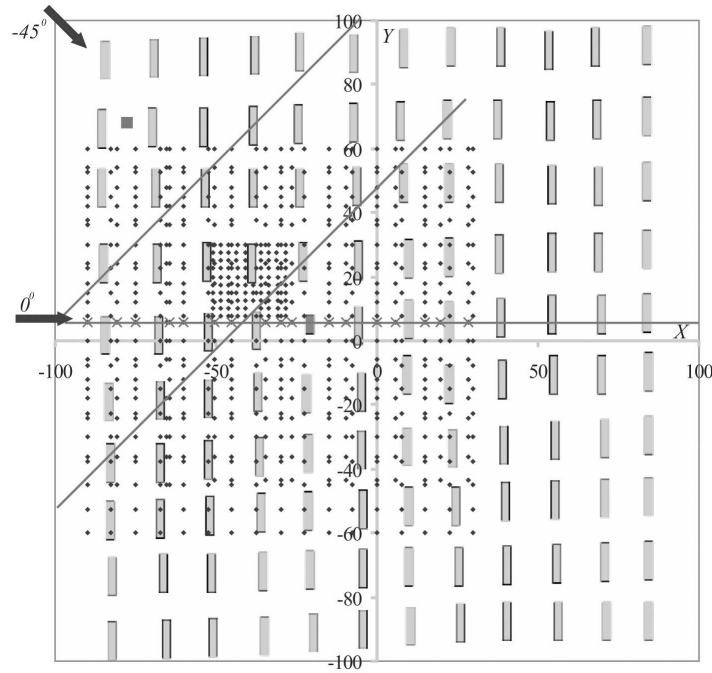


Рис. 1. Геометрия расчетной области. Стрелки соответствуют направлению входящего потока для двух рассматриваемых случаев. Совокупность точек соответствует позициям, в которых проводились измерения, а крестиками и линиями обозначены направления и точки измерений, для которых ниже представлены векторные поля скорости, изолинии и графики функций; малым квадратом обозначен источник примеси, который имеет координаты $x = 77.46$ м, $y = 67.47$ м, $z = 0.0$ м

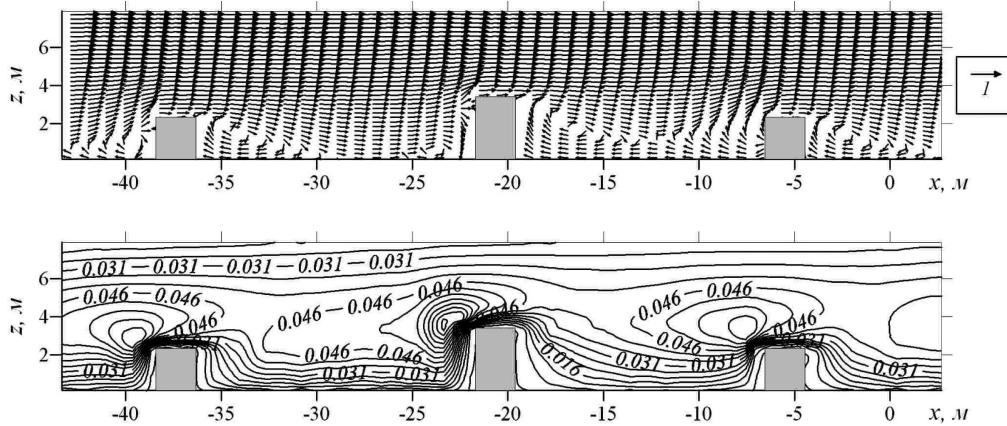


Рис. 2. Векторное поле безразмерной скорости и контурные линии безразмерной кинетической энергии турбулентности в плоскости Oxz . Координата сечения соответствует $y = 6.0$ м

из рисунков, из-за сложной структуры движения воздушных масс стандартная $k-\varepsilon$ -модель не всегда может удовлетворительно предсказывать турбулентную структуру потока, кроме того, в ней недооценивается порождение кинетической энергии в застойных областях. Однако среднее поле скорости выглядит правдоподобным на всех графиках, хотя существует некоторое несоответствие с экспериментальными данными для U_z — компоненты вектора скорости (см. рис. 4). Несомненно, эти свойства модели

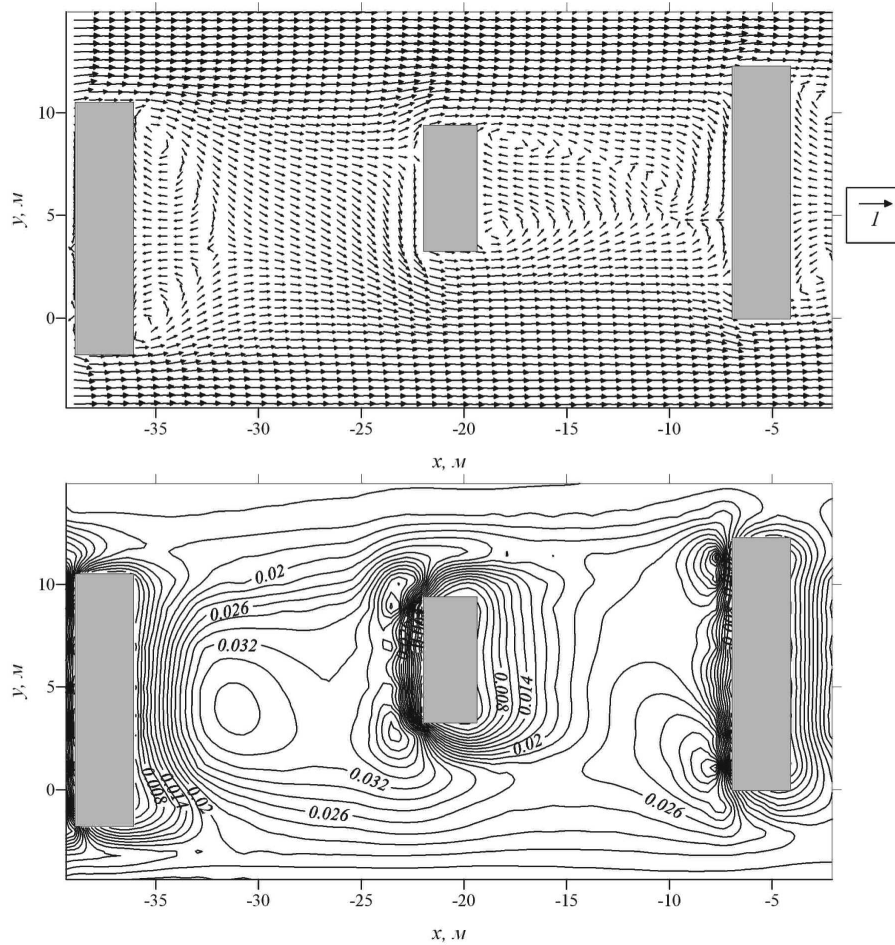


Рис. 3. Векторное поле безразмерной скорости и контурные линии безразмерной кинетической энергии турбулентности в плоскости Oxy . Координата сечения соответствует $z = 1.275$ м (примерно полувысота контейнера)

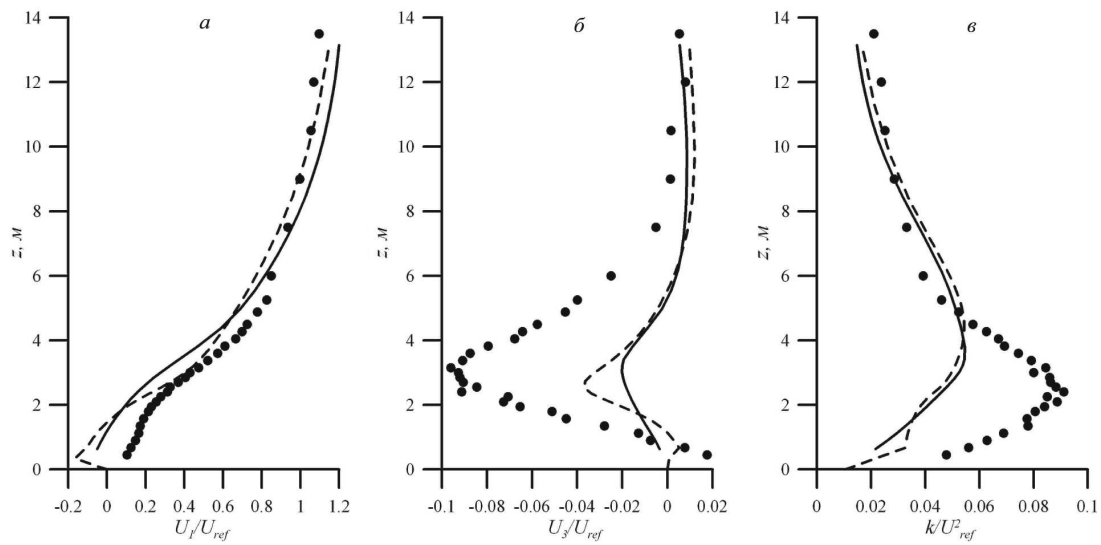


Рис. 4. Профили скорости (a и b) и кинетической энергии ($в$) в точке $x = 13.5$ м, $y = 6$ м за единственным контейнером с высотой 3.51 м; сплошная линия — M2UE, штриховая линия — FLUENT, \bullet — эксперимент [1]

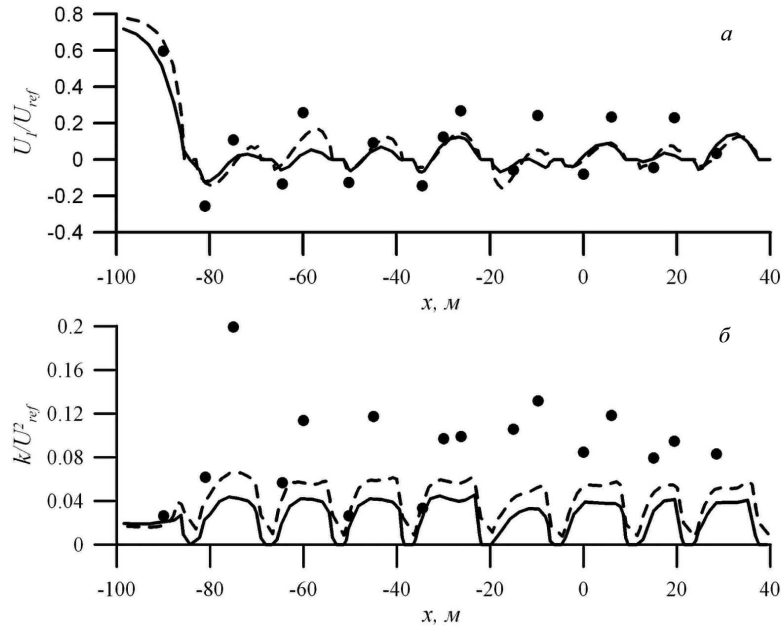


Рис. 5. Профили скорости (а) и кинетической энергии турбулентности (б) вдоль линии с координатами $y = 6$ м, $z = 1.275$ м (см. рис. 1); сплошная линия — M2UE, штриховая линия — FLUENT, ● — эксперимент [1]

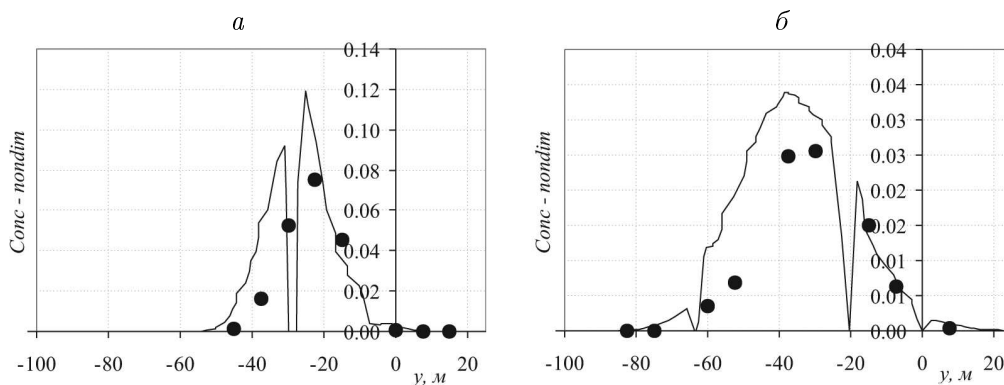


Рис. 6. Профили концентрации примеси в горизонтальном сечении ($z = 1.275$ м) на расстоянии 33 м от источника (слева) и 70 м от источника (справа). Расчеты проводились для направления ветра 45° (см. рис. 1); сплошная линия — M2UE, ● — эксперимент [1]

могут оказывать влияние на прогноз качества атмосферного воздуха в городах. Поэтому необходимо дальнейшее улучшение схемы турбулентного замыкания, например, так, как это сделано в работах [10, 11].

На рис. 6 представлены профили безразмерной концентрации примеси. На графиках безразмерная примесь определяется как $C^* = CU_{ref}H_{ref}^2/Q$, где C — концентрация примеси; H_{ref} — характерный размер (2.54 м); U_{ref} — характерная скорость (5.5 м/с); Q — объемная интенсивность источника. Результаты расчетов говорят о хорошем согласии расчетных и экспериментальных данных. Кроме того, судя по полученным профилям, можно отметить, что двухпараметрическая модель турбулентности удовлетворительно представляет турбулентную структуру потока, в частности турбулентную диффузию примеси в направлении, перпендикулярном к основному потоку.

Заключение

Представлены микромасштабная математическая модель M2UE и метод решения для анализа аэродинамики городской застройки, которая базируется на двухпараметрической $k-\varepsilon$ -модели турбулентности. Проведено сравнение разработанной математической модели с пакетом вычислительной гидродинамики FLUENT и результатами эксперимента MUST. Анализ расчетных данных и результатов эксперимента показал, что разработанная математическая модель в целом достаточно реалистично предсказывает структуру турбулентного движения и распространение примеси. Однако существует и ряд проблем, требующих дальнейшего развития, среди которых основной является недооценка кинетической энергии за препятствиями.

Список литературы

- [1] GAILIS R. Wind Tunnel Simulations of the Mock Urban Setting Test — Experimental Procedures and Data Analysis. DSTO-TR-1532, Published by DSTO Platforms Sciences Laboratory, Australia, 2004.
- [2] LOUKA P., KETZEL M., SAHM P. ET AL. CFD-intercomparison exercise within TRAPOS European Research Network // 7th Conf. on Environmental Sc. and Technology, Syros, Greece, 2001.
- [3] YEE E., BILTOFT C. Concentration fluctuation measurements in a plume dispersing through a regular array of obstacles // Boundary-Layer Meteorol. 2004. Vol. 111. P. 363–415.
- [4] LAUNDER B.E., SPALDING D.B. The numerical computation of turbulent flows // Comp. Methods in Appl. Mech. and Eng. 1974. Vol. 3, N 2. P. 269–289.
- [5] ПАТАНКАР С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
- [6] NOLL B. Evaluation of a bounded high-resolution scheme for combustor flow computation // AIAA J. 1992. Vol. 30, N 1. P. 64–69.
- [7] ЕСАУЛОВ А.О., СТАРЧЕНКО А.В. К выбору схемы для численного решения уравнений переноса // Вычисл. гидродинамика. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1999. С. 27–32.
- [8] ИЛЬИН В.П. Методы неполной факторизации для решения алгебраических систем. М.: Физматлит, 1995. 288 с.
- [9] VANLEER B. Toward the ultimate conservative difference scheme. IV. A second order sequel to Godunov's method // J. of Comp. Phys. 1979. Vol. 32. P. 101–136.
- [10] SHIH T.-H., LIOU W.W., SHABBAR A. ET AL. New “ $k-\varepsilon$ ” eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows-model development and validation // Comp. Fluids. 1995. Vol. 24, N 3. P. 227–238.
- [11] ENRHARD J., MOUSSIOPOULOS N. On a new nonlinear turbulence model for simulating flows around building-shaped structures // J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2000. Vol. 88. P. 91–99.

Поступила в редакцию 21 февраля 2008 г.