

Р.Б. Нутерман, А.В. Старченко

Моделирование движения воздуха в уличном каньоне*Томский государственный университет*

Поступила в редакцию 14.01.2003 г.

Рассматривается стационарное плоскопараллельное изотермическое турбулентное движение вязкой несжимаемой жидкости над поверхностью с крупномасштабными элементами шероховатости. Для решения задачи использовались уравнения Рейнольдса с замыкающими соотношениями Буссинеска. Для определения турбулентных параметров потока используются « $k-\epsilon$ »-модель турбулентности и метод пристенных функций Лаундера–Сполдинга для расчета пристенных течений. Задача решается численно конечно-разностным методом контрольного объема.

Исследовано влияние параметров атмосферы на движение воздушных масс в уличном каньоне. Выявлены неблагоприятные метеорологические ситуации, приводящие к накоплению содержания вредных веществ в элементах городской застройки.

Введение

Система контроля качества воздуха в больших городах должна обеспечивать информацией как о пиковых уровнях загрязнения в короткий промежуток времени, так и о средних значениях концентраций вредных веществ в воздухе. Именно пиковые уровни, в основном, связаны с загрязнением, вызванным передвижением автомобилей. Знание пиковых значений загрязнения и характера их распространения важно, так как они часто превышают предельно допустимые величины.

Чтобы корректно описать ситуацию, складывающуюся вокруг движения городского транспорта в туннелях, на перекрестках больших городов, городских уличных каньонах, необходимо установить связь между источниками загрязнения городского воздуха и приемниками. В этом процессе городское движение играет значительную роль. Двигающееся транспортное средство выбрасывает в воздух отработанные газы, загрязняя окружающую среду. При этом выбросы являются турбулентными. Очевидно, что геометрия исследуемой области играет особую роль. Городской каньон представлен зданиями, между которыми локальные выбросы загрязнений больше, чем фон. В такой ситуации главным является установить распределение выбросов и проследить их относительный вклад в общую картину. Принципиально важными оказываются не только геометрия каньона, но и метеорологические условия.

Цель данной работы состоит в изучении влияния геометрических факторов, формирующих городской уличный каньон, на аэродинамическую картину турбулентного движения воздуха и характер распределения концентраций примеси, поступающей от автотранспорта в городской воздух. Исследование проводится с привлечением математического моделирования и численного решения задачи.

Физическая постановка задачи

В данной задаче рассматривается плоскопараллельное движение вязкой несжимаемой жидкости над поверхностью с элементами крупномасштабной шероховатости. Режим движения – турбулентный, течение – изотермическое. Элементы шероховатости представляют собой прямоугольные препятствия, размер которых соизмерим с размером области исследования.

Профиль скорости на левой границе описывается зависимостью вида

$$u = u_{300} \left(\frac{y - Ly_1}{300 - Ly_1} \right)^{0,3}, \quad y \geq Ly_1,$$

u_{300} – скорость на высоте 300 м. Характер движения – стационарный.

Математическая постановка задачи

Математическая постановка задачи включает уравнения Рейнольдса, записанные с использованием замыкающих соотношений Буссинеска [1]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0; \quad (1)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left[(v + v_T) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(v + v_T) \frac{\partial u}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(v + v_T) \frac{\partial v}{\partial x} \right], \quad (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(v + v_T) \frac{\partial v}{\partial x} \right] + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left[(v + v_T) \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[(v + v_T) \frac{\partial u}{\partial y} \right]. \quad (3)$$

Здесь u, v – проекции вектора скорости на оси Ox и Oy ; ν – кинематическая вязкость воздуха; ν_T – турбулентная вязкость; $\tilde{P} = P + (2\rho k/3)$, где P – давление; k – кинетическая энергия турбулентности; ρ – плотность воздуха.

Граничные условия для системы уравнений (1) – (3) выбираются следующим образом:

– на левой границе при $x = 0$:

$$u(0, y) = u_{300} \left(\frac{y - Ly_1}{300 - Ly_1} \right)^{0,3};$$

$$v(0, y) = 0;$$

– на правой границе при $x = Lx$ используются «мягкие» граничные условия стабилизации потока:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = 0;$$

– на твердой нижней границе используются условия прилипания:

$$u = v = 0;$$

– на верхней границе $y = Ly$ считается, что компоненты скорости известны:

$$u = u_{300} \left(\frac{y - Ly_1}{300 - Ly_1} \right)^{0,3},$$

$$v = 0.$$

Для определения турбулентных параметров потока используется « k - ϵ »-модель турбулентности [2]:

$$u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + P - \epsilon, \quad (4)$$

$$u \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right] + (c_1 P - c_2 \epsilon) \frac{\epsilon}{k}; \quad (5)$$

$$\nu_T = c_\mu (k^2 / \epsilon). \quad (6)$$

Здесь ϵ – диссипация энергии турбулентности k ; генерация энергии турбулентности

$$P = \nu_T \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right];$$

константы $c_1 = 1,44$, $c_2 = 1,92$, $c_\mu = 0,09$, $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_\epsilon = 1,3$.

Граничные условия для уравнений (4), (5) можно записать в следующем виде:

– на левой границе при $x = 0$:

$$k = k_0(y), \quad \epsilon = \epsilon_0(y);$$

– на правой границе при $x = Lx$:

$$\frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial \epsilon}{\partial x} = 0;$$

– на верхней границе при $y = Ly$:

$$\frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = 0.$$

Для задания значений турбулентных параметров вблизи поверхности элементов шероховатости используется метод пристенных функций [2]. Выбор такого способа задания граничных условий для k и ϵ обусловлен тем, что турбулентные характеристики вблизи поверхности (в буферном слое и вязком подслое) изменяются заметным образом. Для описания такого поведения требуется значительное количество узловых точек при конечно-разностном способе решения. В то же время известно, что в зоне развитой турбулентности изменение касательной скорости от расстояния от поверхности хорошо описывается логарифмическим законом, а энергии турбулентности – линейным. В связи с этим для определения значений параметров вблизи стенки в данной работе используется метод пристенных функций Лаундера–Сполдинга [2], согласно которому касательная к поверхности компонента скорости представляется вблизи поверхности как

$$u_\tau = \frac{\tau_w}{\rho c_\mu^{1/4} \kappa k^{1/2}} \ln \left[E c_\mu^{1/4} k^{1/2} n / \nu \right],$$

где $\kappa = 0,42$; $E = 9,0$; τ_w – трение о поверхность. Кинетическая энергия турбулентности k вблизи поверхности (в пристеночной ячейке разностной сетки) определяется из уравнения (4), при этом используются следующие представления для генерации и диссипации энергии турбулентности:

$$P = \nu_T \frac{|\tau_w|}{(\kappa n)^2}, \quad \epsilon = \frac{[k c_\mu^{1/2}]^3}{\kappa n},$$

где n – расстояние от поверхности обтекания.

Поле концентрации загрязняющих веществ определяется из решения уравнения переноса примесей, которое имеет вид

$$\frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\nu}{Sc} + \frac{\nu_T}{Sc_T} \right) \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\nu}{Sc} + \frac{\nu_T}{Sc_T} \right) \frac{\partial C}{\partial y} \right] + S. \quad (7)$$

Здесь C – концентрация примеси; Sc – число Шмидта; Sc_T – турбулентное число Шмидта; S – источниковый член. Это дифференциальное уравнение интегрировалось с нулевым граничным условием для концентрации примеси на левой границе и простыми градиентными соотношениями на остальных границах.

Метод решения

Задача решается численно на равномерной сетке. Дискретизация дифференциальных уравнений осуществляется методом конечного объема [3], при этом аппроксимация конвективных членов уравнений пе-

реноса осуществляется с использованием схемы MLU Ван Лира [4]. Расчетная область составляется фиксированным числом непересекающихся конечных объемов так, чтобы каждый узел расчетной сетки содержался в одном объеме. Разбив таким образом расчетную область, дифференциальные уравнения интегрируют по каждому конечному объему. Для вычисления интегралов используются кусочно-линейные профили, которые описывают изменение переменной между узлами [5]. В результате такого интегрирования получается дискретный аналог дифференциальных уравнений, в который входят значения переменной в нескольких соседних узлах. При его решении использовался метод фиктивных областей, суть которого заключается в том, что значения векторных и скалярных величин в области преграды равны нулю и в фиктивных конечных объемах нет диффузии.

Значения компонент скорости ветра определяются на гранях конечных объемов, а скалярные характеристики в центре. Для расчета поля течения использовалась процедура SIMPLE Патанкара–Сполдинга [3], которая включает в себя следующие операции:

1. Задание начальных приближений для всех зависимых переменных.
2. Решение уравнений изменения количества движения для определения предварительных значений продольной и поперечной составляющих скорости.
3. Решение уравнения Пуассона для поправки давления.
4. Определение нового поля давления.
5. Корректировка скоростей.
6. Решение дискретных аналогов для турбулентных характеристик и концентрации.
7. Принятие полученных значений зависимых переменных в качестве исходных и повторение операций, начиная со второй.

Результаты расчетов и их обсуждение

Для установления характера движения воздуха и распределения концентрации загрязняющих веществ в уличном каньоне, а также для определения зависимости уровня концентрации от геометрических параметров каньона была проведена серия расчетов. Вычисления проводились на сетке размером 81×81 . Два источника выброса загрязнений постоянной интенсивности располагались вблизи поверхности ($y = 0$) на расстоянии 1 м от боковых вертикальных образующих каньона. На рис. 1–5 приведены результаты расчетов и построенные на их основе векторные поля и концентрации. Скорость движения воздуха равнялась 3 м/с. Интенсивность источников поступления примеси не менялась.

Из рисунков видно, что наличие уличного каньона, образованного рядом стоящими высотными домами, оказывает влияние на движение атмосферного

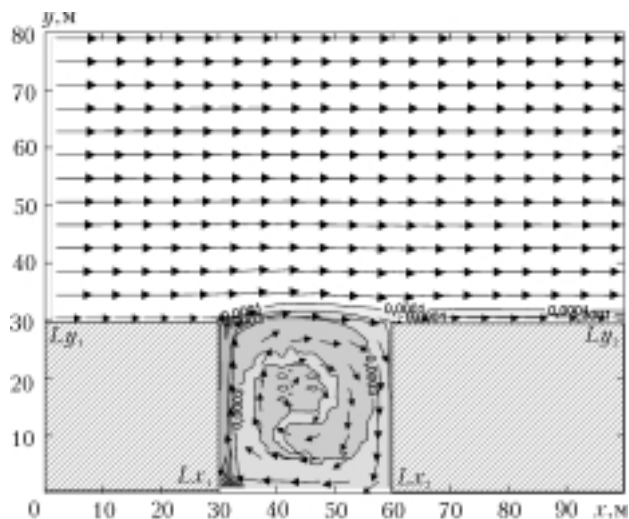


Рис. 1. Векторное поле скорости ветра и распределение концентрации примеси в уличном каньоне. $Ly_1 = Ly_2 = 30$ м; $Lx_2 - Lx_1 = 30$ м

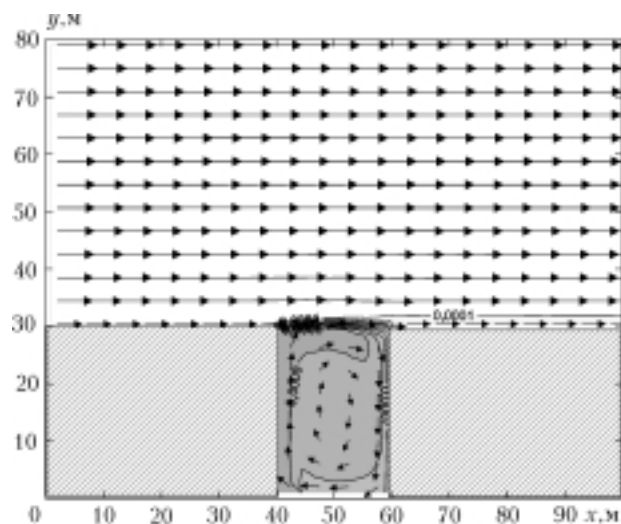


Рис. 2. Векторное поле скорости ветра и распределение концентрации примеси в уличном каньоне. $Ly_1 = Ly_2 = 30$ м; $Lx_2 - Lx_1 = 20$ м

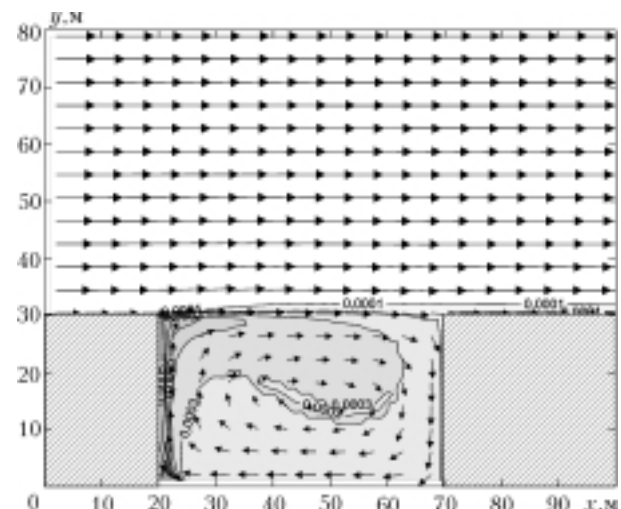


Рис. 3. Векторное поле скорости ветра и распределение концентрации примеси в уличном каньоне. $Ly_1 = Ly_2 = 30$ м; $Lx_2 - Lx_1 = 50$ м

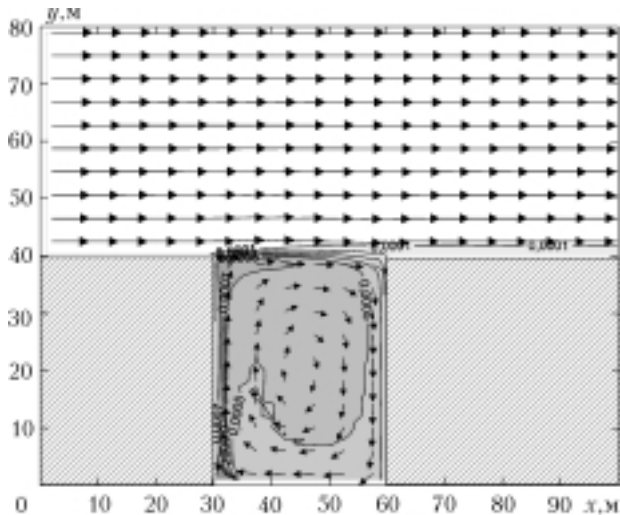


Рис. 4. Векторное поле скорости ветра и распределение концентрации примеси в уличном каньоне. $Ly_1 = Ly_2 = 40$ м; $Lx_2 - Lx_1 = 30$ м

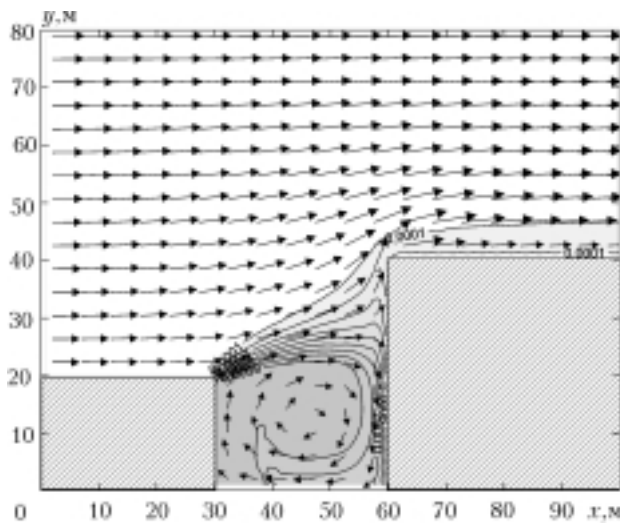


Рис. 5. Векторное поле скорости ветра и распределение концентрации примеси в уличном каньоне. $Ly_1 = 20$ м; $Ly_2 = 40$ м; $Lx_2 - Lx_1 = 30$ м

воздуха над городом. Во всех рассмотренных случаях геометрии каньона наблюдалось образование циркуляционного движения с выносом загрязнений из каньона. Изменение объема каньона оказывает влияние на величину средней концентрации, однако во всех случаях были зафиксированы локальные максимальные концентрации примеси у подветренной стороны каньона.

Как следует из рис. 2 и 4, увеличение глубины или сужение каньона приводят к повышению уровня концентрации загрязняющих веществ. Важно отметить, что увеличение концентрации происходит и в том случае, если здание с подветренной стороны ниже следующего за ним здания (рис. 5).

Заключение

Представлены математическая модель и метод расчета для исследования аэродинамики уличного каньона. Проведены параметрические расчеты по изучению влияния глубины, ширины и формы уличного каньона на движение воздуха в нем и распределения концентрации примеси, поступающей от непрерывных точечных источников, расположенных на дне каньона.

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987. 840 с.
2. Launder B.E and Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows // Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1974. V. 3. N 2. P. 269–289.
3. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
4. Noll B. Evaluation of a Bounded High-Resolution Scheme for Combustor Flow Computation // AIAA Journal. 1992. V. 30. N 1. P. 64–69.
5. Есаулов А.О., Старченко А.В. К выбору схемы для численного решения уравнений переноса // Вычислительная гидродинамика Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1999. С. 27–32.

R.B. Nuterman, A.V. Starchenko. Numerical simulation of air flow in a street canyon.

A steady plane-parallel isothermal turbulent flow of viscous incompressible liquid above a surface with large-scale roughness is studied. The numerical model includes Reynolds equations with Boussinesq closing relations. Turbulent parameters are predicted on the basis of the «k-ε» model of turbulence and the Launder–Spalding’s method of wall functions to calculate near-wall flows. The problem is numerically solved by the finite-volume method.

An influence of atmospheric parameters on air flow in a street canyon is investigated. Difficult environment in the street canyon is detected for some meteorology conditions.