

Р.Б. Нутерман, А.В. Старченко

Моделирование распространения загрязнения воздуха в уличном каньоне

Томский государственный университет

Поступила в редакцию 24.01.2005 г.

Представлены результаты численного исследования переноса примеси над поверхностью с крупномасштабными элементами шероховатости. Для решения задачи использовались осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса, с замыкающими соотношениями Буссинеска. Для определения турбулентных параметров потока применяются модифицированная « $k-\epsilon$ »-модель турбулентности и метод пристенных функций Лаундера–Сполдинга. Задача решается численно методом конечного объема.

Исследовано влияние растительного массива, расположенного вблизи городских проспектов, а также механической турбулентности, генерируемой движущимся автотранспортом, на картину распространения загрязнений воздуха в элементах городской застройки.

Введение

В настоящее время автомобильный транспорт является одним из главных источников загрязнения воздуха в городах [1]. Многие компоненты автомобильных выхлопов, например бензопирен, чрезвычайно вредны для здоровья человека. Поэтому актуальной задачей становится определение концентраций вредных веществ в элементах городской застройки, изучение причин и предотвращение условий возникновения повышенного уровня загрязнения приземного слоя воздуха над урбанизированными территориями.

Одним из способов исследования переноса загрязнений в элементах городской застройки является математическое моделирование, опирающееся на использование уравнений гидродинамики и турбулентной диффузии. Так, в работе [2] для определения структуры турбулентного потока в протяженном уличном каньоне применялись уравнения Рейнольдса и « $k-\epsilon$ »-модель турбулентности в двумерной постановке. Численно установлено, что внутри уличного каньона формируется вихревое движение, центр которого смещается к наветренной стороне в зависимости от силы ветра и конфигурации каньона. В работе [3] представлены результаты численного и экспериментального исследования распределения концентрации вредных веществ в уличном каньоне в зависимости от направления ветра. На основе проведенного анализа установлено, что концентрация вредной примеси с подветренной стороны уличного каньона много больше, чем с наветренной.

В настоящее время группа европейских ученых, работающих по проекту TRAPOS, создала ряд моделей, таких как CHENSI-1, CHENSI-2, MIMO, MISKAM, TASCflow, для расчета распространения вредных примесей от автотранспорта [4]. В качестве основных уравнений во всех этих моделях ис-

пользуются нестационарные уравнения Рейнольдса для представления осредненного турбулентного движения. Для их замыкания применяется « $k-\epsilon$ »- или « $k-\omega$ »-модель турбулентности, а также их различные версии. В качестве транспортного уравнения для описания дисперсии примеси служит уравнение конвекции-диффузии. Численная реализация всех моделей осуществляется на разнесенной сетке (кроме TASCflow). В модели CHENSI-1 дифференциальные уравнения решаются конечно-разностным методом, а в CHENSI-2, MIMO, MISKAM применяется метод конечного объема. Уравнения в модели TASCflow решаются с помощью метода конечных элементов. С помощью этих моделей можно исследовать распространение загрязнения как в отдельно взятом уличном каньоне, так и в целых жилых массивах.

Целью данной работы является построение математической модели турбулентного движения воздуха и переноса примеси в протяженном уличном каньоне, исследование влияния конфигурации элементов городской застройки и ограниченных массивов растительности на аэродинамику потока и уровень загрязнения атмосферного воздуха.

Постановка задачи

Рассматривается двумерное турбулентное изотермическое движение воздуха над поверхностью с элементами крупномасштабной шероховатости.

Элементы шероховатости представляют собой прямоугольные препятствия, размеры которых соизмеримы с размерами области исследования. Рассматриваются два вида препятствий: непроницаемые для потока здания и проницаемые массивы растительности или отдельно стоящие деревья. Характер движения стационарный.

Математическая постановка задачи включает осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса,

записанные с использованием замыкающих соотношений Буссинеска [5]:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{P}}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left[(v + v_{\tau}) \frac{\partial U}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(v + v_{\tau}) \frac{\partial U}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(v + v_{\tau}) \frac{\partial V}{\partial x} \right] - F_x, \quad (2)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{P}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(v + v_{\tau}) \frac{\partial V}{\partial x} \right] + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left[(v + v_{\tau}) \frac{\partial V}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[(v + v_{\tau}) \frac{\partial U}{\partial y} \right] - F_y. \quad (3)$$

Здесь U, V – проекции вектора скорости на оси Ox и Oy ; ν – кинематическая вязкость воздуха; ν_{τ} – турбулентная вязкость; $\tilde{P} = P + 2/3\rho k$, где P – давление; k – кинетическая энергия турбулентности; ρ – плотность; F_x, F_y – проекции силы сопротивления движению воздуха в массиве растительности. Выражения для F_x, F_y имеют вид

$$F_x = \eta C_f a U \sqrt{U^2 + V^2}, \quad F_y = \eta C_f a V \sqrt{U^2 + V^2},$$

где η – доля поверхности, покрытой деревьями; C_f – коэффициент сопротивления; a – плотность растительности в лесном массиве (например, для массивов сосновых деревьев $\eta = 1, C_f = 0,2, a = 0,3125 \text{ м}^2/\text{м}^3$ [6]).

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

– 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 $x = Lx$:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\partial V}{\partial x} = 0;$$

– на нижней границе:

$$U = V = 0;$$

– на верхней границе при $y = Ly$:

$$U = U_{300} \left(\frac{Ly - Ly_1}{300 - Ly_1} \right)^{0,3};$$

$$V = 0.$$

Поле концентрации газообразной инертной примеси определяется из решения уравнения переноса, которое имеет вид

$$\frac{\partial(U C)}{\partial x} + \frac{\partial(V C)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\nu}{Sc} + \frac{\nu_{\tau}}{Sc_{\tau}} \right) \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\nu}{Sc} + \frac{\nu_{\tau}}{Sc_{\tau}} \right) \frac{\partial C}{\partial y} \right] + I, \quad (4)$$

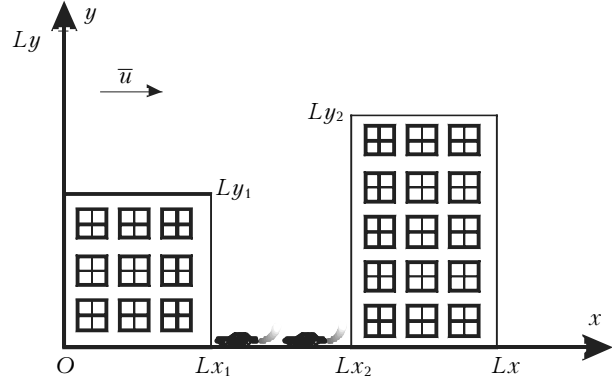


Рис. 1. Геометрия области исследования

где C – концентрация примеси; Sc – число Шмидта; Sc_{τ} – турбулентное число Шмидта; I – источниковый член, определяющий интенсивность поступления примеси. В данной работе осаждение газообразной примеси, выбрасываемой автотранспортом (например, монооксида углерода), на обтекаемых и пронизываемых препятствиях не учитывается, поскольку интенсивность поглощения газообразной примеси в уличном каньоне с небольшой растительностью много меньше скорости ее поступления с автомобильными выхлопами [1]. Дифференциальное уравнение (4) интегрировалось с нулевым граничным условием для концентрации примеси на левой границе и простыми градиентными соотношениями на остальных границах.

Для определения турбулентных параметров потока используется « k – ϵ »-модель турбулентности [7]:

$$U \frac{\partial k}{\partial x} + V \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\nu + \frac{\nu_{\tau}}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\nu + \frac{\nu_{\tau}}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + G - \epsilon + F_k, \quad (5)$$

$$U \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + V \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\nu + \frac{\nu_{\tau}}{\sigma_{\epsilon}} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\nu + \frac{\nu_{\tau}}{\sigma_{\epsilon}} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right] + (c_1 G - c_2 \epsilon) \frac{\epsilon}{k} + F_{\epsilon}; \quad (6)$$

$$\nu_{\tau} = c_{\mu} \frac{k^2}{\epsilon}, \quad (7)$$

где ϵ – диссипация энергии турбулентности k ; генерация энергии турбулентности

$$G = \nu_{\tau} \left[2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right];$$

константы $c_1 = 1,44, c_2 = 1,92, \sigma_k = 1,0, \sigma_{\epsilon} = 1,3$. В уравнениях (5), (6) F_k, F_{ϵ} – дополнительные источниковые члены, моделирующие влияние растительности на турбулентность, которые имеют вид:

$$F_k = U F_x + V F_y, \quad F_{\epsilon} = \frac{\epsilon}{k} C_{pe1} (U F_x + V F_y),$$

где $C_{pe1} = 2,0$ [6]. Движущийся автотранспорт — это не только источник выбросов примеси в атмосферу, но и генератор так называемой механической турбулентности, обусловленной возмущением воздуха вследствие перемещения объектов конечной длины, имеющих существенное сопротивление. В данной работе учет этого фактора осуществлен (так же, как и в [8]) путем добавления соответствующих членов в « k – ϵ »-модель турбулентности. Результаты проведенных расчетов показали, что включение в модель механической турбулентности приводит к увеличению роли турбулентной диффузии в распространении примеси в элементах городской застройки из-за повышения уровня турбулентности. Для учета порождения кинетической энергии турбулентности за счет движения автотранспорта в уравнение (5) добавляется к правой части член $C_{car}V_{car}^2Q_{car}$, а в уравнение (6) — слагаемое, отвечающее за диссипацию механической энергии турбулентности, которое имеет вид $C_{car}V_{car}^2Q_{car}(\epsilon/k)$, где $C_{car} = 0,0015$ — эмпирический коэффициент; V_{car} — скорость автомобилей; Q_{car} — число автомобилей в секунду [8].

В данной работе рассмотрены два варианта замыкающего соотношения (7). В первом случае значение коэффициента c_μ равно 0,09, как в оригинальной « k – ϵ »-модели [7], во втором случае учитывается эффект влияния кривизны линий тока на турбулентные касательные напряжения и на степень анизотропии нормальных напряжений [9]:

$$c_\mu = \frac{0,09}{\left[1 + 0,285 \frac{k^2}{\epsilon^2} \frac{\partial U_s}{\partial n} U_{ss} \Omega\right]}, \quad (8)$$

где

$$\frac{\partial U_s}{\partial n} = U_{ss}\Omega + \Omega_1 \sin(2\theta) + (\Omega_2 + \Omega_3) \cos(2\theta).$$

При этом

$$\begin{aligned} \Omega &= (\Omega_1 UV + \Omega_2 U^2 - \Omega_3 V^2) / U_{ss}^3, \\ \Omega_1 &= \frac{\partial V}{\partial y} - \frac{\partial U}{\partial x}, \quad \Omega_2 = \frac{\partial V}{\partial x}, \quad \Omega_3 = \frac{\partial U}{\partial y}; \\ \theta &= \arctg\left(\frac{U}{V}\right); \quad U_{ss} = \sqrt{U^2 + V^2}. \end{aligned}$$

Граничные условия для уравнений (5)–(7) имеют вид:

— 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 городской застройки используется метод пристенных функций Лаундера–Сполдинга [7], 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 на поверхности; n — расстояние от поверхности обтекания. Кинетическая энергия турбулентности k вблизи поверхности (в пристеночной ячейке разностной сетки) определяется из уравнения (5), при этом используются следующие представления для генерации и диссипации энергии турбулентности:

$$G = \nu_\tau \frac{|\tau_w|}{\rho (\kappa n)^2}; \quad \epsilon = \frac{\left[\kappa c_\mu^{1/2} \right]^{3/2}}{\kappa n}.$$

Решение задачи и результаты вычислений

Задача решается численно на равномерной сетке. Дискретизация дифференциальных уравнений осуществляется методом конечного объема [10], при этом аппроксимация конвективных членов уравнений переноса выполняется с использованием схемы MLU Ван Лира [11]. Для вычисления интегралов используются кусочно-линейные профили, которые описывают изменение функции между узлами [12]. В результате такой дискретизации получаются сеточные уравнения, решаемые методом неполной факторизации Булеева [13]. Для согласования поля давления с полем скорости используется процедура SIMPLE Патанкара–Сполдинга [10]. Для проверки адекватности модели и метода решения была проведена серия тестовых расчетов.

Тест 1. Турбулентное движение за уступом [14]

Высота уступа $h = 0,076$ м, а скорость жидкости во входном сечении равна 10 м/с. Режим течения соответствует числу Рейнольдса 50 000. Вычисления проводились в области размером 2 м по оси Ox и 0,4 м по оси Oy на сетке размером 150×80. При этом расчеты осуществлялись при $c_\mu = 0,09$, а также с учетом влияния кривизны линий тока на турбулентную структуру потока [c_μ вычисляется по (8)]. На рис. 2, 3 представлены векторное поле турбулентного движения за уступом, график изменения коэффициента давления, безразмерная скорость и кинетическая энергия турбулентности вниз по потоку.

Из расчетов видно, что в случае применения стандартной « k – ϵ »-модели зона рециркуляционного течения меньше, чем она есть на самом деле. Модификация модели турбулентности с целью учета влияния кривизны линий тока на турбулентную структуру позволяет более точно рассчитать зону рециркуляции.

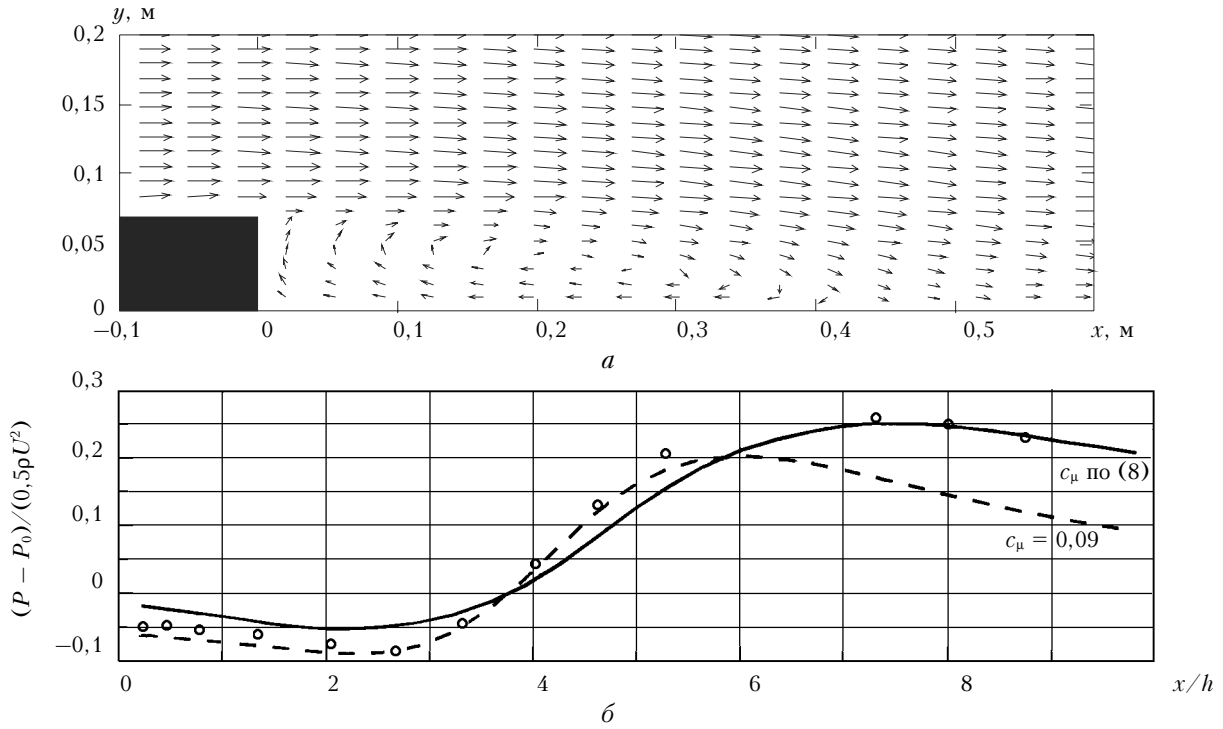


Рис. 2. Векторное поле скорости при обтекании пластины с уступом. $Re = 50000$, $h = 0,076$ м (c_μ по (8)) (а); распределение коэффициента давления за обращенным назад уступом. \circ – эксперимент [14] (б)

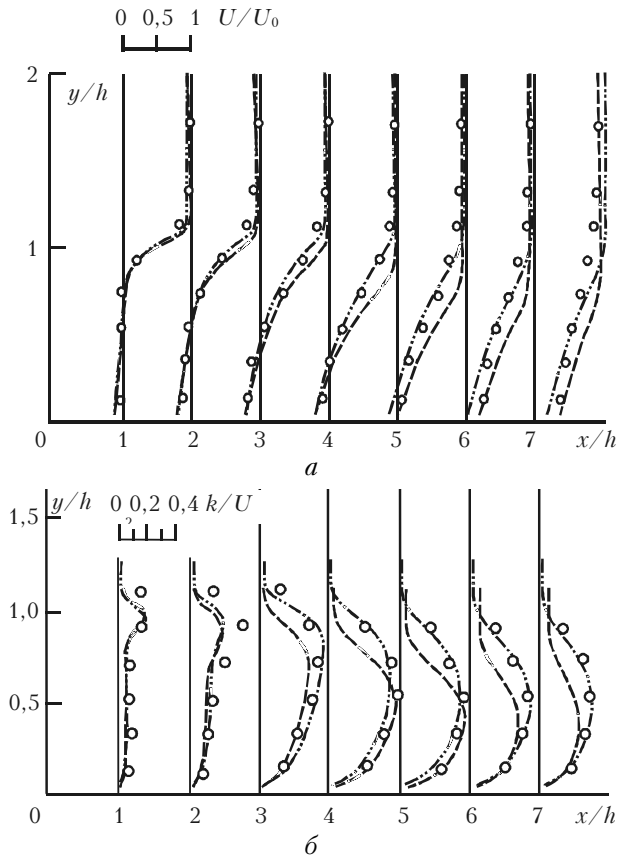


Рис. 3. Профили скорости и кинетической энергии турбулентности за уступом. --- $c_\mu = 0,09$, -.- c_μ вычислено по (8); \circ – эксперимент [14]

Тест 2. Перенос примеси в уличном каньоне

Была рассчитана зависимость безразмерной концентрации примеси в каньоне от направления ветра, и проведено сравнение полученных результатов с другими подобными моделями, а также экспериментальными данными, приведенными в [4]. Безразмерная концентрация определяется как $c^* = CU_{Href}H/I$, где C_{left} – концентрация на левой стенке каньона; U_{Href} – скорость на высоте H_{ref} (например, 100 м); H – характерная высота (например, средняя высота зданий около 16 м) и I – интенсивность источника выбросов загрязнения. Для сравнения результатов выбирались следующие модели: MISKAM 1.1 (Microscale Flow and Dispersion Model) (двумерная микромасштабная модель течения и переноса примеси), MISKAM 3.51, MISKAM 3.6 (трехмерные микромасштабные модели течения и переноса примеси) [15], OSPM (Danish Operational Street Pollution Model) (двумерная модель загрязнения городского уличного каньона) [16]. Рис. 4 показывает результаты, полученные для «идеальной» формы каньона шириной и высотой 16 м и длиной 90 м. По причинам симметрии представлены измерения по направлениям от 90 до 270°; 180° соответствуют потоку, параллельному улице.

Наилучшее согласование с результатами, полученными в аэродинамической трубе [4], показала модель MISKAM 1.1. Новейшие версии этой модели предсказывают как завышенные значения концентрации с наветренной стороны (90°, MISKAM. 3.51), так и заниженные по сравнению с экспериментом

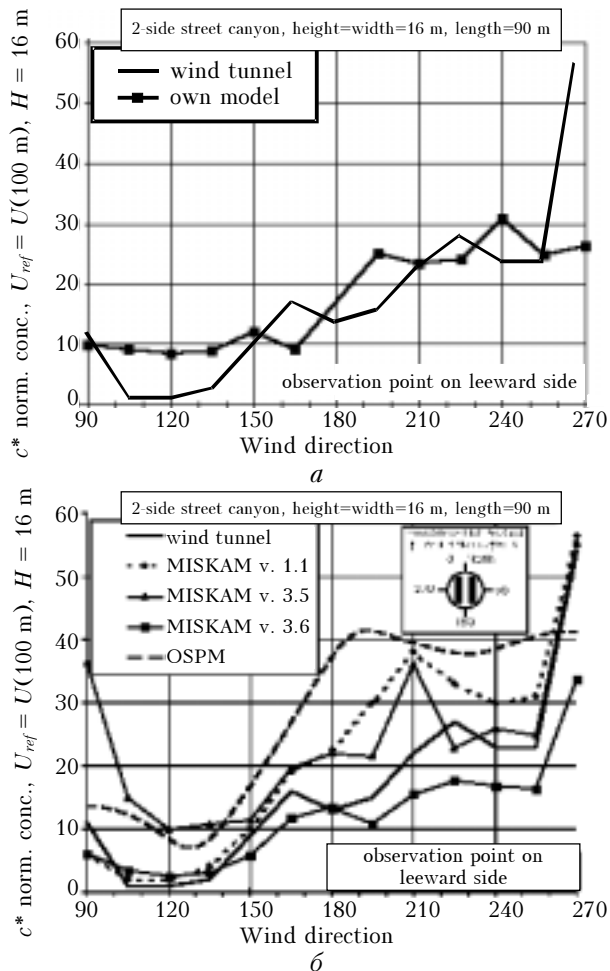


Рис. 4. Зависимость безразмерной концентрации в уличном каньоне от направления ветра. Расчеты по моделям (1)–(8) (а); MISKAM, OSPM и эксперименты в аэродинамической трубе [16] (б)

с подветренной стороны (270°, MISKAM. 3.6). OSPM дает большие значения за исключением 270°, где четко выраженный максимум не достигается. Произведенные с помощью модели (1)–(8) аналогичные вычисления (результат показан на рис. 4, а) наглядно демонстрируют, что низкий уровень концентрации имеет место на наветренной стороне. Необходимо отметить, что в целом наблюдается хорошее согласование с экспериментальными данными, представленными в [4].

Тест 3. Движение воздушных масс за отдельно стоящим деревом высотой H

Область исследования представлена на рис. 5.

На рис. 6 приведены вертикальные профили осевой скорости и кинетической энергии турбулентности на различных расстояниях от дерева. Вычисления показывают, что в области, занимаемой растительностью, преобладают процессы вязкой диссипации, вследствие чего за деревом кинетическая энергия турбулентности имеет минимальные значения. В то же время из-за значительных градиентов скорости в верхней части кроны дерева и над ним наблю-

дается повышение интенсивности турбулентного переноса на этой высоте. Сопротивление, которое оказывает набегающему потоку проницаемая преграда, приводит к уменьшению осевой компоненты скорости за деревом (рис. 6). С другой стороны, вследствие того что у основания плотность растительности ниже, вблизи поверхности имеют место более высокие значения осевой скорости (рис. 6). В целом получено хорошее согласование с данными измерений [6] и физической картиной процесса, описанной в [1]. Следует также заметить, что учет влияния кривизны линий тока на турбулентные характеристики и степень анизотропии нормальных напряжений [формула (8)] позволяют предсказать распределение кинетической энергии, в большей степени соответствующее реальной турбулентной структуре потока, чем с использованием стандартной « $k-\epsilon$ » модели турбулентности [7].

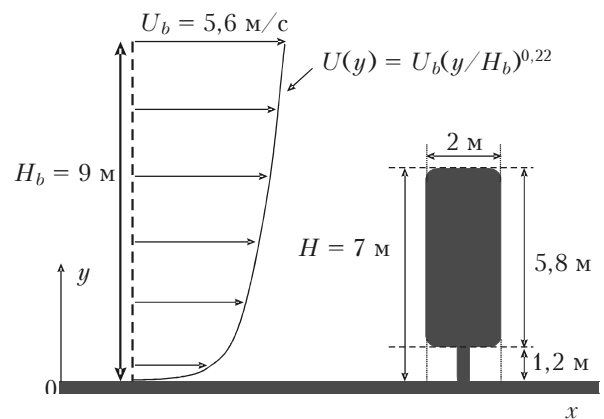


Рис. 5. Область исследования движения воздуха за отдельно стоящим деревом

Предложенная математическая модель была применена к исследованию аэродинамики потока и переноса примеси, поступающей от движущегося автотранспорта, в элементах городской застройки. Расчеты проводились на сетке размером 161×121 . Источники поступления примеси постоянной интенсивности располагались вблизи поверхности ($y = 0$) на расстоянии 5 м от зданий (см. рис. 1). Скорость набегающего потока $U_{300} = 1$ м/с. В расчетах скорость движения автотранспорта принималась равной $U_{car} = 10$ м/с, а интенсивность движения автомобилей $C_{car} = 0,5$ с $^{-1}$.

На рис. 7 представлены линии тока (а, в) и изолинии концентрации примеси (б, г) в уличном каньоне со следующими геометрическими характеристиками: $Ly_1 = Ly_2 = 30$ м; $Lx_2 - Lx_1 = 30$ м (см. рис. 1). Результаты расчетов показывают, что в каньоне образуется вращательное движение воздуха, направление и интенсивность которого определяются значением скорости основного потока. Увлекаемая вращательным движением воздуха примесь, которая поступает из источников, расположенных на дне каньона, переносится к подветренной стороне и далее отчасти выносится в основной поток, отчасти возвращается в область, ограничен-

ную вертикальными стенками близко стоящих зда-
ний.

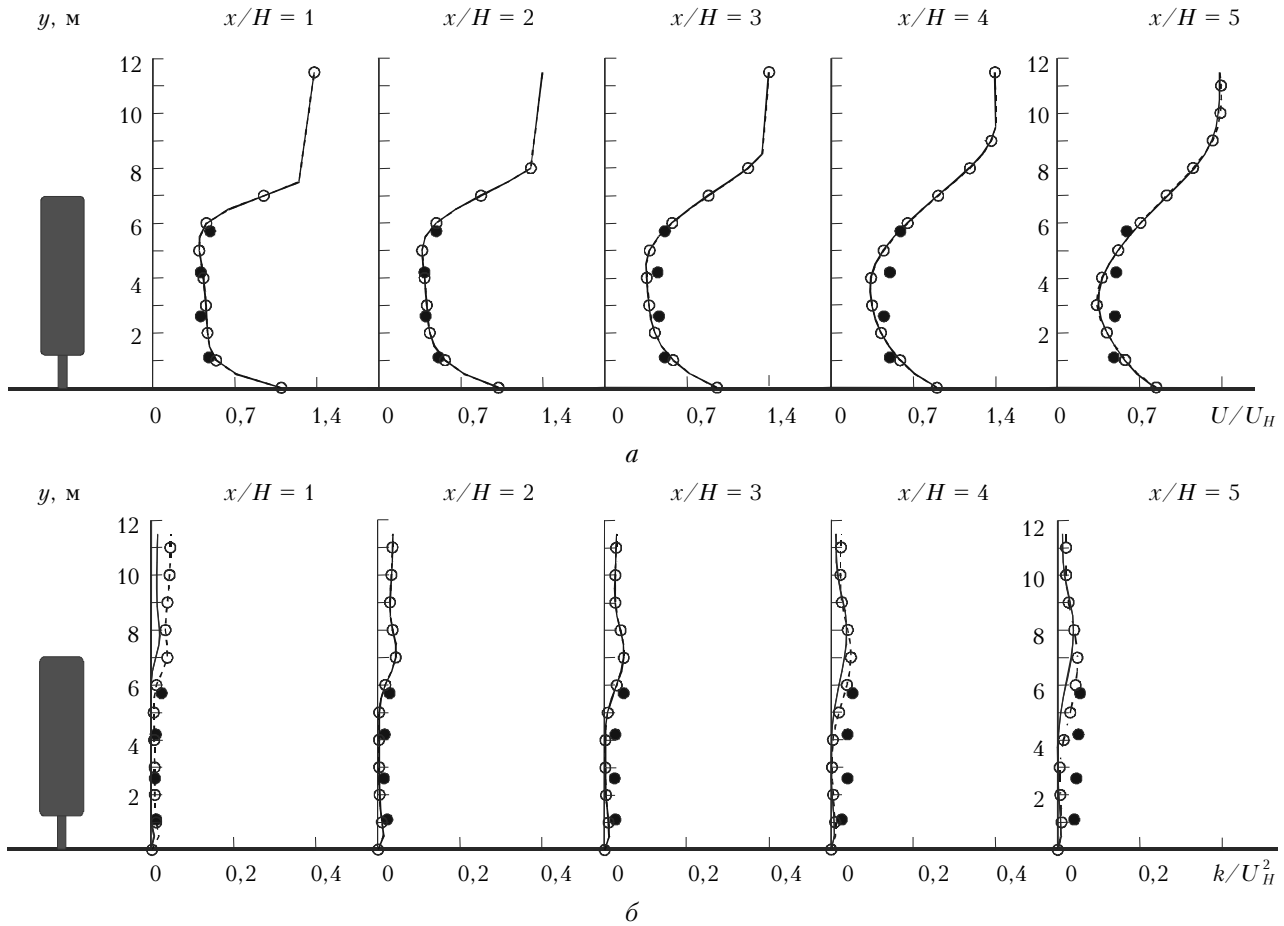


Рис. 6. Сравнение вертикальных профилей скорости и кинетической энергии за деревом. • эксперимент [6]; — $c_m = 0,09$, --○-- c_m вычислено по (8); U_H — скорость при $y = H$

Скорость рециркуляционного потока в каньоне существенно ниже скорости воздуха над зданиями, что способствует образованию повышенного уровня содержания примеси во всем объеме каньона и особенно вблизи источников выбросов и у подветренной стороны каньона. Следует отметить, что изменение объема уличного каньона оказывает влияние на уровень загрязнения воздуха в нем [17], однако локальные максимальные значения концентрации загрязняющих веществ постоянно фиксируются у подветренной стороны каньона.

Наличие небольшого массива растительности (несколько сосновых деревьев), расположенного в центре уличного каньона (рис. 7, в, г; $42,5 \leq x \leq 47,5$ м; $1 \leq y \leq 15$ м), при остальных перечисленных выше неизменных параметрах расчета приводит к существенному снижению скорости вращательного движения из-за увеличения сопротивления потоку. Кроме того, появление пронизаемого препятствия в уличном каньоне выражается в деформации линий тока в массиве растительности и за ним, связанной с подъемным движением воздуха, прошедшего у основания преграды. Интенсивность вентиляции уличного каньона снижается, что приводит к повышению уровня концентрации примеси во всем объеме кань-

она и особенно у подветренной стороны. Дополнительному рассеянию примеси также способствует интенсификация турбулентного переноса, обусловленная изменением характера рециркуляционного движения, выражающегося в подъеме турбулизованного загрязненного потока за пронизаемой преградой.

На рис. 8 представлены линии тока и изолинии концентрации примеси в потоке, обтекающем протяженное здание.

Источник поступления примеси располагается на расстоянии 5 м от препятствия. Результаты расчетов показали, что в потоке образуются две обширные рециркуляционные зоны: внизу у наветренной стороны здания и над зданием вниз по потоку (рис. 8, а). Наибольшие значения концентрации газообразной примеси наблюдаются в случае, когда автотрасса расположена вблизи наветренной стороны здания. Это объясняется тем, что в области рециркуляционного течения скорость движения воздушных масс и турбулентная диффузия существенно меньше, чем в набегающем потоке, а также тем, что имеется вихревое движение, из-за которого примесь постоянно циркулирует в этой области течения и выносится лишь частично. Если же источник за-

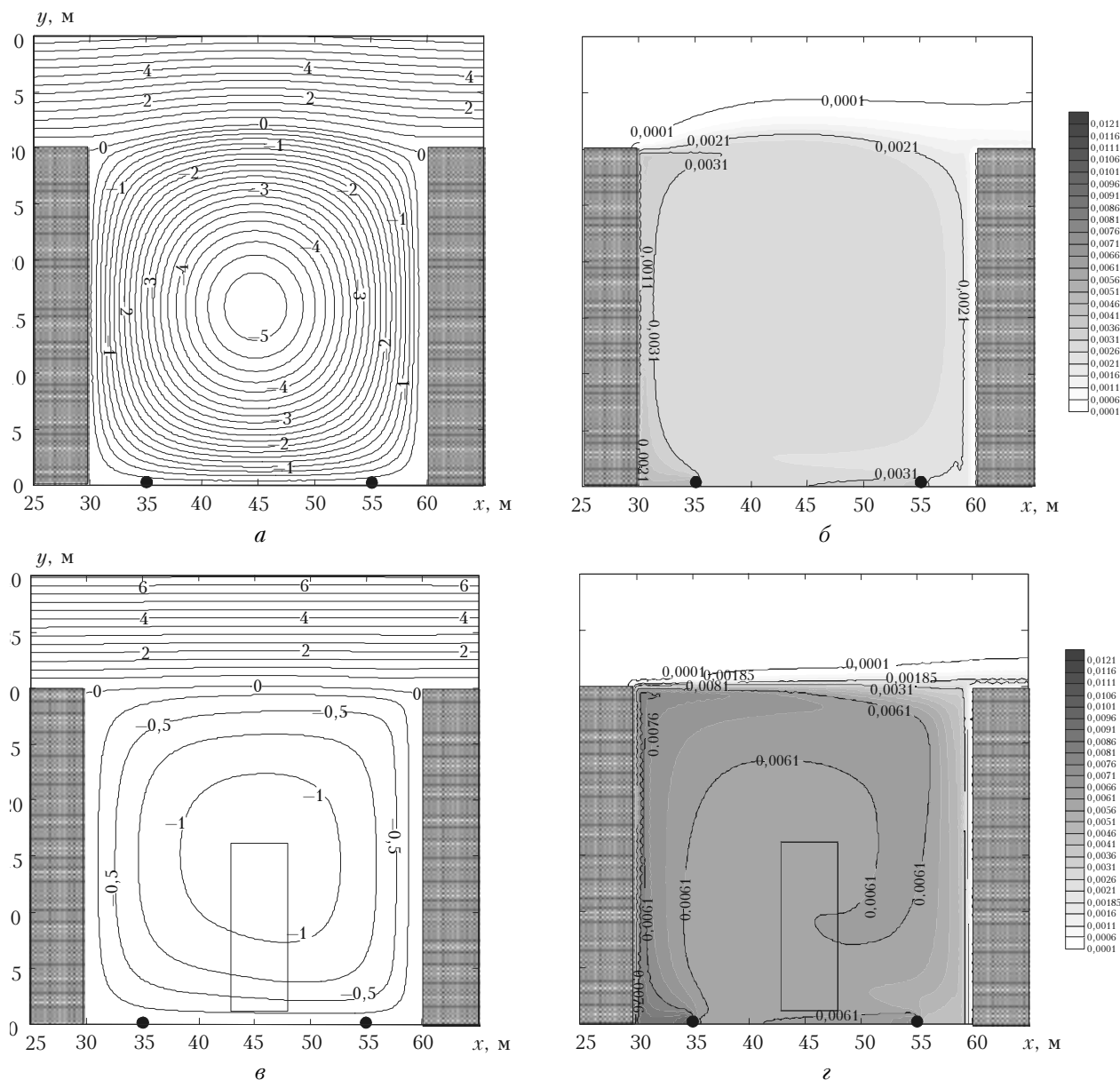


Рис. 7. Линии тока и распределение концентрации в уличном каньоне. $Ly_1 = Ly_2 = 30$ м; $Lx_2 - Lx_1 = 30$ м. Источники выброса загрязнения в точках $(x = 35, y = 0)$; $(x = 55, y = 0)$; прямоугольник – растительная зона

грязнения находится выше по потоку ($x \leq 20$ м), то это приводит к более интенсивному рассеиванию примеси над зоной рециркуляции, так как на данном участке течения турбулентная диффузия велика.

Наличие перед зданием ограниченной зоны растительности (рис. 8, б; $25 \leq x \leq 40$ м; $1 \leq y \leq 15$ м; массив сосновых деревьев) приводит к изменению аэродинамической картины течения. Проницаемая преграда стабилизирует набегающий поток и тем самым предотвращает условия образования зоны рециркуляции течения перед зданием. Вследствие этого примесь в основном выносится вертикальным потоком и размеры области ее рассеяния становятся существенно меньше. Поэтому уровень загрязнения воздуха вблизи источника при рассматриваемых условиях выше по сравнению с ситуацией, показанной на рис. 8, а.

Заключение

Представлены математическая модель и метод расчета для исследования аэродинамики в элементах городской застройки. Проверена и установлена согласованность модели с данными измерений. Выполнены расчеты по распределению концентрации газообразной примеси, поступающей от непрерывных источников выбросов автотранспорта в уличном каньоне и вблизи отдельного здания. Исследовано влияние массива растительности, расположенного вблизи городской автотрассы, на аэродинамическую картину течения и рассеяние примеси. Выявлены неблагоприятные факторы, приводящие к накоплению вредных выбросов в приземном слое воздуха в элементах городской застройки.

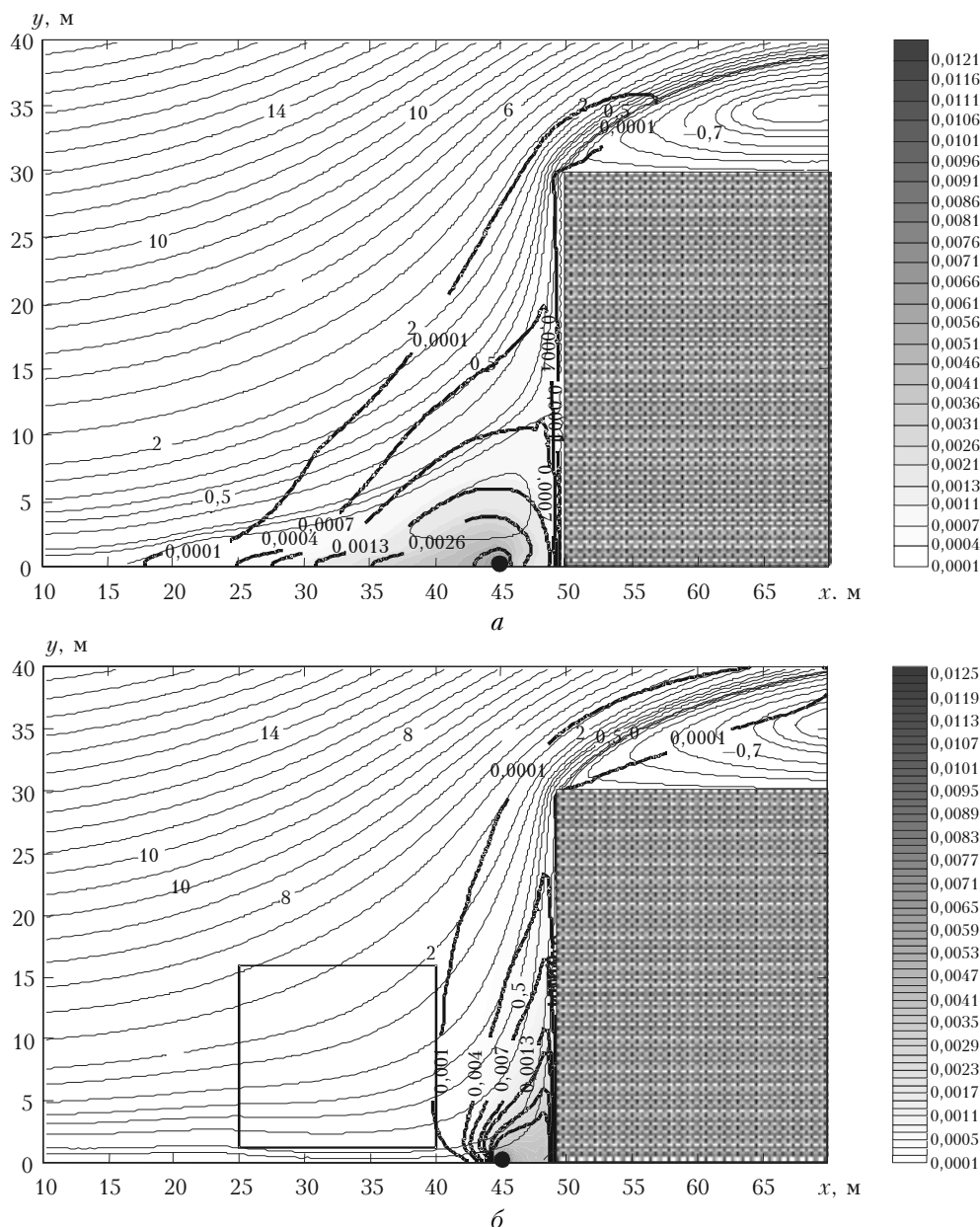


Рис. 8. Линии тока и распределение концентрации для здания, расположенного с наветренной стороны. $Ly_1 = 0$ м, $Ly_2 = 30$ м; $Lx_1 = 0$ м, $Lx_2 = 50$ м. Источник загрязнения в точке $(x = 45, y = 0)$; квадрат – растительная зона

1. Оке Т.Р. Климаты пограничного слоя. Л.: Гидрометеопиздат, 1982. 360 с.
2. Huang H., Akutsu Y., Arai M., Tamura M. A two-dimensional air quality model in an urban street canyon: evaluation and sensitivity analysis // Atmos. Environ. 2000. V 34. N 5. P. 689–698.
3. Louka P., Ketzler M., Sahm P., Guilloteau E., Mousiopoulos N., Sini J.-F., Mestayer P.G., Berkowicz R. CFD intercomparison exercise within TRAPOS European research network // 7th Intern. Conf. on Environ. Sci. and Technol. 2001. N 9. P. 1–8.
4. Ketzler M., Berkowicz R., Lohmeyer A. Comparison of numerical street dispersion models with results from wind tunnel and field measurements // Environ. Monitoring and Assess. 2000. V 65. N 1–2. P. 363–370.
5. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987. 840 с.
6. Kimura A., Iwata T., Mochida A., Yoshino H., Ooka R., Yoshida S. Optimization of Plant Canopy Model for Reproducing Aerodynamic Effects of Trees: (Part 1) Comparison between the canopy model optimized by the present authors and that proposed by Green // Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan. 2003. N 9. P. 721–722.
7. Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows // Computational Methods in Appl. Mechanics and Engineering. 1974. V. 3. N 2. P. 269–289.
8. URL: <http://www2.dmu.dk/AtmosphericEnvironment/trapos/texte/louka-camb.pdf>
9. Leschziner M.A., Rodi W. Computational of strongly swirling axisymmetric free jets // AIAA Journal. 1984. V 22. N 12. P. 1742–1747.

10. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
11. Noll B. Evaluation of a Bounded High-Resolution Scheme for Combustor Flow Computation // AIAA Journal. 1992. V. 30. N 1. P. 64–69.
12. Есаулов А.О., Старченко А.В. К выбору схемы для численного решения уравнений переноса // Вычислительная гидродинамика. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1999. С. 27–32.
13. Ильин В.П. Методы неполной факторизации для решения алгебраических систем. М.: Физматлит, 1995. 288 с.
14. Турбулентные сдвиговые течения 1: Сб. статей. М.: Машиностроение, 1982. 432 с.
15. Eichhorn J. MISKAM-Handbuch zur Version 3.xx. Giese-Eichhorn. Wachernheim. Germany. October 1998. 55 p.
16. Berkowicz R., Hertel O., Larsen S.E., Sørensen N.N. and Nielsen M. Modelling traffic pollution in streets. National Environment Research Institute, Roskilde, Denmark, 1997. 55 p.
17. Нутерман Р.Б., Старченко А.В. Моделирование движения воздуха в уличном каньоне // Оптика атмосферы и океана. 2003. Т. 16. № 5–6. С. 523–526.

R.B. Nuterman, A.V. Starchenko. Numerical simulation of air pollution 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 Navier–Stokes equations averaged by Reynolds with the Boussinesq closing assumption. Turbulent parameters are predicted on the basis of modified « k – ϵ »-model of turbulence and the Launder–Spalding’s method of wall functions to predict near-wall flows. The problem is numerically solved by the finite-volume method.

An influence of urban vegetation on air pollution and the effect of vehicle-induced turbulence on dispersion of pollution in a street canyon were investigated.