

Р.Б. Нутерман, А.В. Старченко

Пространственная модель для прогноза распространения выбросов автотранспорта в элементах городской застройки

Томский государственный университет

Поступила в редакцию 1.02.2007 г.

Представлены результаты численного моделирования аэродинамики и переноса примеси в элементах городской застройки. Микромасштабная модель включает уравнения Рейнольдса для предсказания аэродинамики, уравнения двухпараметрической « $k-\varepsilon$ »-модели турбулентности. Численное решение уравнений получено на основе метода конечного объема.

Предложенная математическая модель прошла апробацию на серии экспериментальных тестов. Кроме того, проводилось сравнение с данными полевых измерений, которые осуществлялись в рамках проекта TRAPOS (Optimisation of Modelling Methods for Traffic Pollution in Streets).

Цель работы и математическая постановка задачи

Выбросы выхлопных газов автотранспортом становятся главным источником загрязнения воздуха в городской среде. Уличные каньоны — это один из наиболее важных элементов города, где относительно велика плотность транспортных средств и воздействие вредных веществ на человеческий организм сильно возрастает. Сценарный анализ и прогноз загрязнения атмосферного воздуха в уличных каньонах позволяют определять неблагоприятные условия с образованием локально высоких концентраций выхлопов, а также дают возможность при планировании городского рельефа в полной мере учитывать естественную вентиляцию городских кварталов.

Для исследования характера распространения газообразных примесей атмосферного воздуха, поступающих от автомобильного транспорта, в элементах городской застройки наряду с экспериментальными методами широко используются методы математического моделирования [1–3], которые включают уравнения гидродинамики, модели турбулентности и уравнения турбулентной диффузии. В настоящее время интерес к разработке микромасштабных метеорологических моделей существенно возрос в связи с перспективой их применения для создания надежных схем параметризации городского пограничного слоя для мезомасштабных моделей атмосферы [4].

В данной статье описаны пространственная микромасштабная модель и метод расчета, а также их апробация на экспериментальных данных для течений вблизи препятствий и в уличных каньонах.

Микромасштабная модель аэродинамики и переноса примеси основана на стационарных трехмерных уравнениях Рейнольдса, двухпараметрической

« $k-\varepsilon$ »-модели турбулентности [5] и уравнении адвекции-диффузии для описания переноса примеси, при этом основные теплофизические свойства рассматриваются постоянными. Уравнения сохранения массы, импульса и концентрации примеси имеют следующий вид:

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[v \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial(-\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j}, \quad (2)$$

$$i = 1, 2, 3,$$

$$\frac{\partial(U_j C)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[D \left(\frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \right] + \frac{\partial(-\overline{u'_j c'})}{\partial x_j} + S. \quad (3)$$

В этих уравнениях U_i и C — осредненные компоненты скорости и концентрация примеси соответственно; u'_i и c' — пульсации компонент вектора скорости и концентрации; ρ — плотность жидкости; P — давление; v и D — молекулярная кинематическая вязкость и молекулярная диффузия соответственно; x_i — декартовы координаты; S — источник постоянной интенсивности. По повторяющемуся индексу j в (1)–(3) ведется суммирование от 1 до 3.

Напряжения Рейнольдса $\overline{u'_i u'_j}$ и турбулентные диффузионные потоки $\overline{u'_j c'}$ моделируются с использованием замыкающих соотношений Буссинеска:

$$\overline{u'_i u'_j} = -\nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} k \delta_{ij},$$

$$\overline{u'_j c'} = -\Gamma_t \frac{\partial C}{\partial x_j}, \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j, \\ 0, & i \neq j. \end{cases}$$

Двухпараметрическая модель турбулентности имеет следующий вид [5]:

$$U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = v_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \varepsilon, \quad (4)$$

$$U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_1 v_t \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (5)$$

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad \Gamma_t = \frac{v_t}{S_{C_t}},$$

где k и ε — это турбулентная кинетическая энергия и турбулентная диссипация соответственно, а константы $C_\mu = 0,09$, $C_1 = 1,44$, $C_2 = 1,92$, $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$, $S_{C_t} = 0,7$.

Движущийся автотранспорт представляет собой не только источник выбросов примеси в атмосферу, но и является генератором так называемой механической турбулентности, обусловленной возмущением воздуха вследствие регулярного перемещения объектов конечной длины, имеющих существенное сопротивление. В данной работе учет этого фактора осуществлен (так же, как и в [3]) путем добавления соответствующих членов в « k – ε »-модель турбулентности. Для учета порождения кинетической энергии турбулентности за счет движения автотранспорта в уравнении (4) добавляется к правой части следующий член $C_{car} V_{car}^2 Q_{car}$, а в уравнении (5) — слагаемое, отвечающее за диссипацию механической энергии турбулентности, которое имеет вид $C_{car} V_{car}^2 Q_{car} (\varepsilon/k)$, где $C_{car} = 0,0015$ — эмпирический коэффициент [3]; V_{car} — скорость автомобилей; Q_{car} — число автомобилей в секунду (в расчетах $V_{car} = 8,333$ м/с, а $Q_{car} = 0,347$ [6]).

Краевые условия на выходе из области исследования и на открытых боковых границах — это равенство нулю нормальных производных, а краевые условия на твердых поверхностях и на входе имеют следующий вид:

– на входе при $x = x_1$:

$$U_1 = U_{in}(x_3), \quad U_2 = U_3 = 0, \quad C = 0,$$

$$k = k_{in}(x_3), \quad \varepsilon = \varepsilon_{in}(x_3);$$

– на твердой поверхности:

$$U_1 = U_2 = U_3 = 0, \quad \frac{\partial C}{\partial n} = 0,$$

где U_{in} , k_{in} , ε_{in} — известные функции от вертикальной координаты x_3 ; n — вектор нормали к границе; x_3 — вертикальная координата.

Для расчета турбулентных параметров потока у стенки используется метод пристеночных функций Лаундера–Сполдинга [5].

Метод решения и результаты расчетов

Дискретизация дифференциальных уравнений осуществляется методом конечного объема [7], при этом аппроксимация конвективных членов уравнений переноса выполняется с использованием схемы MLU Ван Лира [8]. Для вычисления интегралов применяются кусочно-линейные профили, которые описывают изменение зависимой переменной между узлами [9]. 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 в том, что значения векторных и скалярных величин в области преграды равны нулю и в фиктивных конечных объемах нет диффузии. Система сеточных уравнений решается явным методом Булева [10].

Течения вокруг плохо обтекаемых тел, которые имеют место в различных инженерных приложениях, в том числе и при исследовании аэродинамики элементов городской застройки, включают сложные явления, такие как разделение и присоединение потока, образование нестационарного вихря, повышенный уровень турбулентности. Естественно, что на практике существует необходимость предсказывать такого рода течения, хотя это трудная задача даже для относительно простых геометрий.

В данной статье для тестирования микромасштабной модели атмосферного пограничного слоя рассматривается течение вокруг куба высотой h , расположенного в канале высотой $2h$ и шириной $4h$, расстояние между фронтальной гранью куба и входной границей $60h$ (рис. 1). Для этой геометрии число Рейнольдса $Re = U_b h / \nu = 40000$, $U_b = 28,8$ м/с — средняя скорость потока на входе в канал. Результаты экспериментального исследования этого течения представлены в статье [11]. Вычисления проводились на сетке $97 \times 82 \times 42$. Расчеты и измерения показывают, что даже при такой простой геометрии наблюдается очень сложное течение (см. рис. 1).

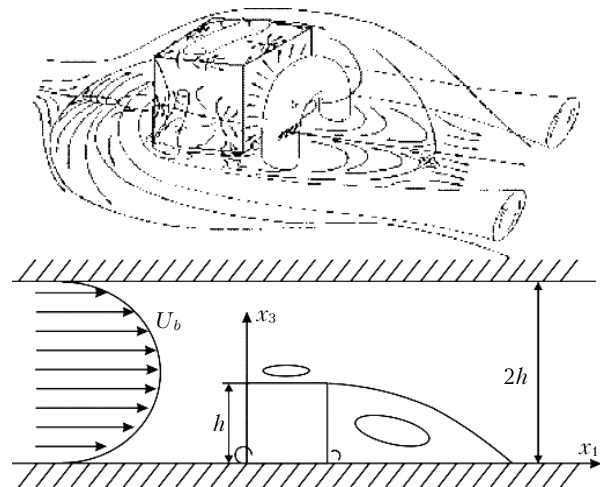


Рис. 1. Схематичное изображение течения вокруг куба [11]

По ходу движения поток разделяется на фронтальной грани куба, при этом образуются вторичные рециркуляции на верхней грани куба и у его боковых плоскостей, а также у нижней части фронтальной грани (рис. 2).

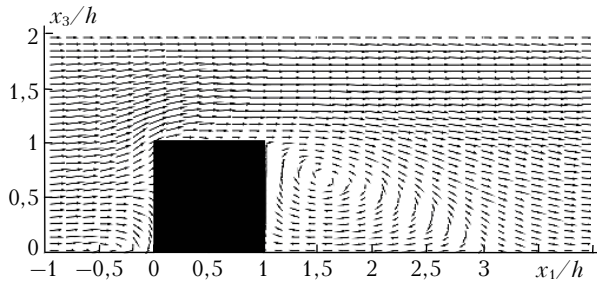


Рис. 2. Векторное поле скорости в плоскости $x_2 = 0$ для течения вокруг куба

При этом основной вихрь в следе за кубом имеет форму подковы и там развивается большая отрывная зона, которая взаимодействует с подковообразным вихрем. В дополнение ко всему в области рециркуляции за кубом образуется вихрь в виде арки (рис. 1–3).

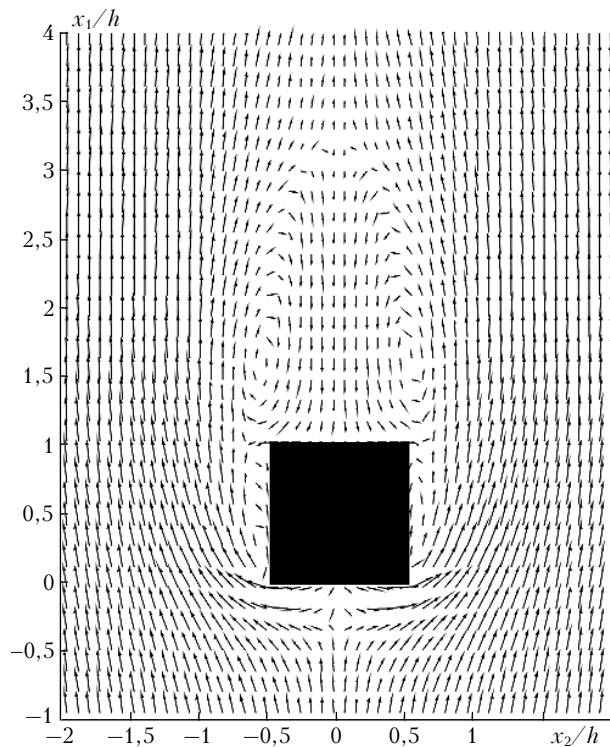


Рис. 3. Векторное поле скорости для течения вокруг куба при $x_3/h = 0,075$

Расчеты показывают, что широко используемая в инженерных расчетах стандартная « $k-\epsilon$ »-модель не вполне адекватно моделирует течение и турбулентную структуру в области, где встречаются рециркуляционные движения жидкости (рис. 4).

Это хорошо видно, если рассмотреть уровень кинетической энергии за кубом (рис. 5).

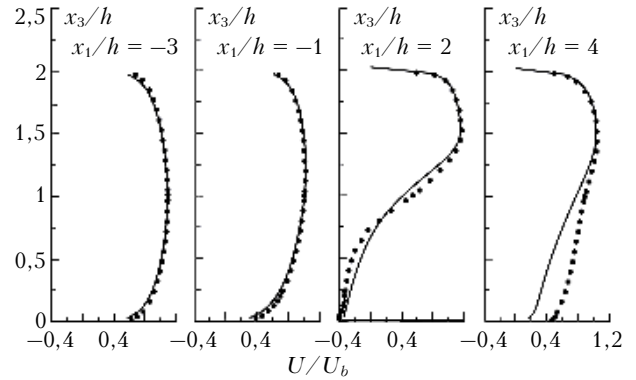


Рис. 4. Продольная составляющая вектора скорости U_1 для течения вокруг куба; — расчет по модели, • — эксперимент [11]

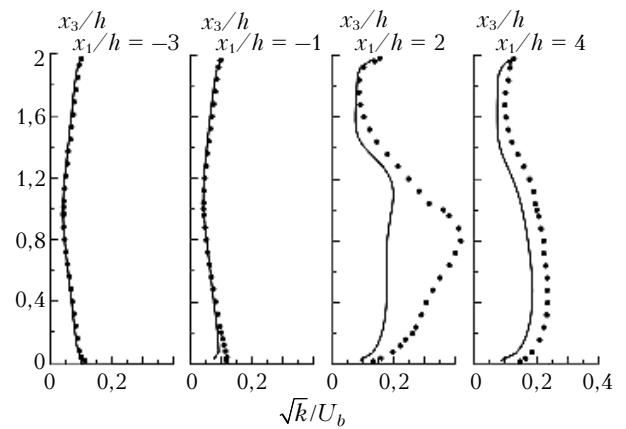


Рис. 5. Турбулентная кинетическая энергия для течения вокруг куба; — расчет по модели, • — эксперимент [11]

Такое поведение объясняется тем, что двухпараметрическая модель предсказывает величину уровня генерации кинетической энергии за препятствием значительно меньше, чем она есть на самом деле. В результате этого турбулентная вязкость становится меньше, и вихрь в следе за кубом увеличивается. Тем не менее следует надеяться, что введение определенных модификаций в удобной в расчетном плане « $k-\epsilon$ »-модели позволит получить более правдоподобные данные моделирования [12].

Осознавая важность тестирования математических моделей для решения задачи распространения примесей в городской застройке, группа ученых по проекту TRAPOS (Optimisation of Modelling Methods for Traffic Pollution in Streets) [13] инициировала организацию и подготовила ряд тестовых случаев, которые включают в себя сравнение между экспериментальными и численными результатами. Наиболее сложный среди них — исследование аэродинамики и переноса примеси в участке городской застройки, окружающем ул. Геттингер в г. Ганновере. Для этой задачи доступны полевые измерения [14] и лабораторные данные [15] о концентрации примеси в одной точке вблизи источников выбросов, а также метеорологические данные, зарегистрированные над крышей самого высокого здания. На рис. 6 представлены векторное поле горизонтальной компоненты

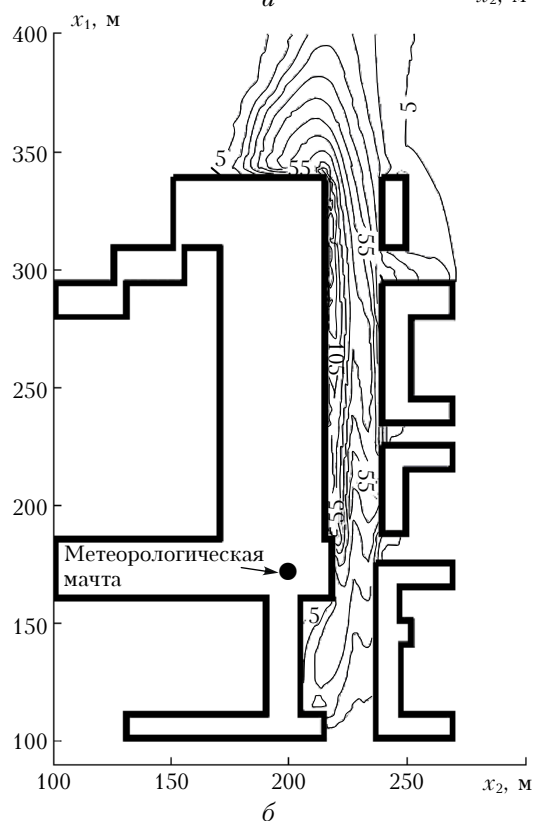
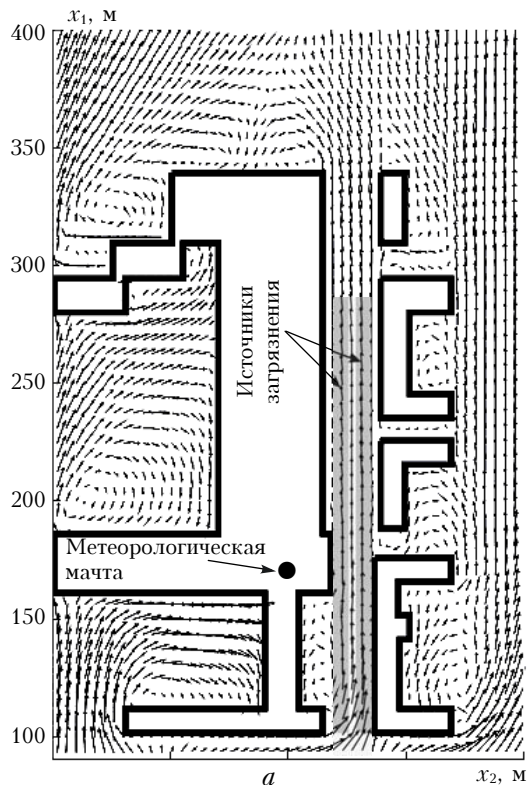


Рис. 6. Приземное векторное поле скорости (а) и уровни концентрации (б) на ул. Геттингер; ● – метеорологическая мачта ($x_3 = 10,5$ м)

скорости и безразмерная концентрация примеси $c^* = CV_{ref}H/(Q/L)$ ($V_{ref} = 10$ м/с – характерная скорость на высоте 100 м; $H = 20$ м – средняя вы-

сота здания; Q – интенсивность выбросов автотранспорта; $L = 180$ м – длина линейного источника).

Набегающий поток имеет направление движения с юга на север. Геометрическая модель для расчета в данной работе является точной копией ул. Геттингер (см. рис. 6). Подробное описание этого случая, включая краевые условия и параметры шероховатости поверхностей, получены из базы данных в Интернете, которая была составлена в рамках проекта TRAPOS [13]. Расчеты показывают сложное турбулентное движение воздушных масс (см. рис. 6). Видно образование вихревых структур вблизи углов зданий, так же как и вовлечение воздушных масс в рециркуляционное движение с противоположной стороны улицы, что приводит к накоплению выбросов от автотранспорта. Однако при таком направлении движения основного воздушного потока, примесь, поступающая с выхлопами автотранспорта, практически не попадает во внутренние дворы, а сносится потоком вдоль улицы с повышением концентрации у левой стороны автотрассы.

На рис. 7 представлены результаты сравнения между рассчитанными и измеренными значениями вектора скорости и турбулентной кинетической энергии в области над метеорологической мачтой (см. рис. 6).

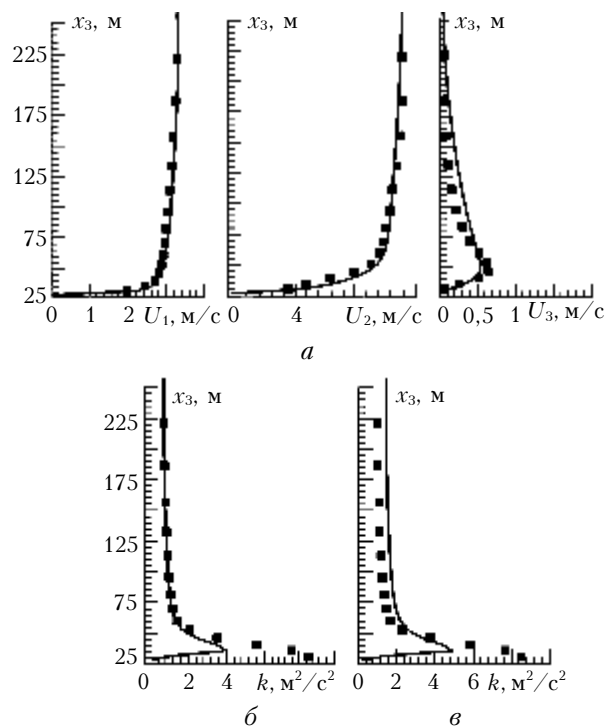


Рис. 7. Компоненты вектора скорости и кинетическая энергия; — — расчет по модели, ■ – эксперимент [15]; а – компоненты вектора скорости; б – без источника механической турбулентности; в – с источником механической турбулентности

Как видно из рис. 7, существует небольшая переоценка U_3 компоненты скорости, в то время как остальные компоненты практически идеально совпадают с измерениями. Однако в области, близкой

к крыше самого высокого здания, где экспериментальные данные показывают высокие уровни k , существует недооценка рассчитанной турбулентной кинетической энергии (рис. 7, б). Добавление источникового члена (рис. 7, в), который моделирует генерацию энергии турбулентности автотранспортом, приводит к увеличению общего уровня турбулентности, хотя недооценка k у крыши все же остается.

Заключение

Представлены результаты применения микро-масштабной модели аэродинамики и переноса примеси в городской застройке. Проведены расчеты для двух сложных геометрий и выявлены достоинства и недостатки использовавшейся модели. Показано, что стандартная « k - ϵ »-модель не вполне адекватно воспроизводит рециркуляционные течения. Кроме того, исследовано влияние автотранспорта, генерирующего дополнительную турбулентность, на турбулентную структуру потока для реального случая городской застройки. Получено хорошее согласование с экспериментальными данными. Тем не менее предложенная математическая модель для турбулентных характеристик потока нуждается в усовершенствовании, так как небольшие отличия в картине течения, направлении вектора скорости могут стать причинами неправильного предсказания распространения выбросов автотранспорта в городской застройке.

Работа выполнена при финансовой поддержке INTAS (INTAS Ref. № 06-1000016-5928) и РФФИ (проект № 07-05-01126).

1. Оке Т.Р. Климаты пограничного слоя. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 360 с.
2. Nuterman R.B., Starchenko A.V. A modeling of air flow in a street canyon // Proc. SPIE. 2004. V. 5396. P. 89–98.

3. Нутерман Р.Б., Старченко А.В. Моделирование движения воздуха в уличном каньоне // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18. № 8. С. 649–657.
4. Baklanov A.A., Mestayer P.G. Improved parameterisation of urban atmospheric sublayer and urban physiographic data classification // DMI Scientific Report. 2004. N 04–05. P. 75.
5. Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows // Comput. Methods in Appl. Mechan. and Eng. 1974. V. 3. N 2. P. 269–289.
6. Louka P. Contribution of Petrova Louka to the TRAPOS WG-TPT meeting in Cambridge. URL: <http://www2.dmu.dk/atmosphericenvironment/trapos/louka-camb.pdf>
7. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
8. Noll B. Evaluation of a Bounded High-Resolution Scheme for Combustor Flow Computation // AIAA J. 1992. V. 30. N 1. P. 64–69.
9. 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.
10. Ильин В.П. Методы неполной факторизации для решения алгебраических систем. М.: Физматлит, 1995. 288 с.
11. Martinuzzi R., Tropea C. The flow around surface-mounted, prismatic obstacles placed in a fully developed channel flow // J. Fluid Eng. 1993. V. 115. P. 85.
12. Rodi W. Comparison of LES and RANS calculations of the flow around bluff bodies // J. Wind Eng. and Industr. Aerodyn. 1997. V. 69. N 71. P. 55–75.
13. URL: <http://www2.dmu.dk/atmosphericenvironment/trapos/>
14. Chauvet C., Leitl B., Schatzmann M. High Resolution Measurements in an Idealised Street Canyon // Proc. of the 3rd Int. Conf. on Urban Air Quality. Loutraki, Greece. March, 2001.
15. Liedtke J., Leitl B., Schatzmann M. Dispersion in a street canyon: Comparison of wind tunnel experiments with field measurements // Proc. of Eurotrac Symp. 98. WIT Press, 1999. P. 806–810.

R.B. Nuterman, A.V. Starchenko. Spatial model for forecast of vehicle emission-distribution in elements of urban canopy.

The results of numerical modeling of aerodynamics and pollution transfer in urban obstacles are presented. The spatial micro-scale model includes Reynolds equations for aerodynamics prediction near the non-penetrable and penetrable obstacles, two-equation « k - ϵ »-model of turbulence. The numerical solution of equations is based on the finite volume method.

The mathematical model was verified by a set of experiments. Besides, the micro-scale model is compared with the field data, obtained in the frame of TRAPOS (Optimisation of Modeling Methods for Traffic Pollution in Streets).