На правах рукописи

Нутерман Роман Борисович

Моделирование турбулентных течений и переноса примеси в элементах городской застройки

Специальность 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Томск - 2008

Работа выполнена на кафедре вычислительной математики и компьютерного моделирования в ГОУ ВПО «Томский государственный университет»

Работа выполнена в отделе исследований в ГУ «Датский метеорологический институт» (Research Department, Danish Meteorological Institute)

Научные руководители:	доктор физико-математических наук, профессор Старченко А.В.
	доктор физико-математических наук, профессор Бакланов А.А.
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук, профессор Матвиенко О.В.
	кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Зверев В.Г.
Ведущая организация:	Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск

Защита состоится 4 июля 2008 г. в 10.00 на заседании диссертационного совета Д 212.267.13 при ГОУ ВПО «Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Автореферат разослан 30 мая 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук Ю.Ф. Христенко

Актуальность работы

Наиболее важным элементом городских территорий любого мегаполиса являются зоны плотной жилой застройки центральной части города, где требуется обеспечить в максимальной степени социальный и экологический комфорт населения при рациональном использовании ресурсов и городских земель. Основными источниками загрязнения воздуха жилых территорий являются промышленные предприятия, отопительные котельные и автомобильный транспорт. Среди них наиболее значительную долю загрязнения атмосферного воздуха в пределах жилых территорий вносит автотранспорт. Специфика автотранспорта, как подвижного источника загрязнения, проявляется в низком его расположении и непосредственной близости к зонам жилой застройки. Все это приводит к тому, что автотранспорт создает в городах обширные и устойчивые зоны, в пределах которых предельно-допустимая концентрация загрязняющих веществ в атмосферном воздухе превышена в несколько раз.

Современные методы вычислительной гидродинамики позволяют решать задачи, связанные с переносом атмосферных примесей внутри городской застройки. Однако, необходимо учитывать тот факт, что правильное предсказание турбулентной структуры воздушного потока обеспечивает корректное моделирование не только полей скорости и давления, но и процессов, связанных с рассеянием и турбулентным перемешиванием выбросов в атмосфере города. Поэтому особое внимание необходимо уделять методике моделирования турбулентности, а также схеме турбулентного замыкания в рамках выбранного подхода.

Работа выполнялась в соответствии с основными направлениями НИР Томского государственного университета в рамках темы 1.02.04, 1.12.06 ЕЗН Министерства образования РФ, а также по научным проектам, поддержанным грантами программы INCO COPERNICUS 2 Европейской комиссии (№ ICA2–CT–10024), INTAS (№ 06–1000016–5928), РФФИ (№ 04–07–90219, № 07–05–01126), Министерства образования (№ A03–2.8–693).

Целью работы является исследование аэродинамики и переноса примеси в уличных каньонах на основе современных математических моделей турбулентных течений.

Для достижения данной цели сформулированы следующие основные **задачи исследования**:

- построение микромасштабной математической модели турбулентных течений и переноса примеси;
- разработка эффективных методов численного решения уравнений Рейнольдса и «адвекции-диффузии»;
- апробация некоторых дифференциальных моделей турбулентности для моделирования турбулентных течений и переноса примеси между элементами городской шероховатости;
- анализ влияния геометрических и метеорологических условий, растительности, движущегося автотранспорта на уровень загрязнённости приземного слоя воздуха.

Научная новизна полученных автором результатов заключается в следующем:

- разработана новая пространственная микромасштабная математическая модель для описания турбулентных рециркуляционых течений и переноса примеси в городском подслое, учитывающая влияние растительности и движущегося автотранспорта;
- для условий городского уличного каньона проведена апробация некоторых дифференциальных моделей турбулентности; на основе результатов сравнения с расчётами и экспериментальными данными других авторов впервые показано, что для моделирования подобных течений достаточным является использование двухпараметрической «$k-\varepsilon$» модели турбулентности;
- на основании параметрических расчётов выявлены новые особенности турбулентного течения и загрязнения воздуха в уличном каньоне в зависимости от наличия и расположения уличной растительности и интенсивности движущегося автотранспорта, а также геометрических параметров области исследования.

Практическая значимость работы определяется тем, что предложенная модель и созданный алгоритм решения многомерных нестационарных транспортных уравнений позволяют рассчитывать турбулентную картину движения воздушных масс и предсказывать предельно допустимые концентрации примеси в конкретных участках городской застройки. Разработанная математическая модель и численный метод расчёта используются в созданной в Томском государственном университете и Институте оптики атмосферы СО РАН моделирующей системе прогноза и исследования качества атмосферного воздуха над городом Томск, а также в проекте

Евросоюза (European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research, COST732), который посвящён разработке методики для оценки и улучшения качества микромасштабных моделей.

Обоснованность научных положений и выводов, сделанных в диссертационной работе, следует из адекватности физических и математических моделей и численных методов, используемых в работе, что подтверждается сравнением с результатами экспериментов, а также с известными теоретическими данными других авторов и расчётами с использованием лицензированного программного обеспечения.

На защиту выносятся:

- математическая модель для исследования турбулентных течений и переноса примеси в элементах городской застройки;
- результаты апробации некоторых дифференциальных моделей турбулентности для моделирования течений в уличных каньонах;
- новые закономерности турбулентных течений и переноса примеси в городском подслое в зависимости от наличия и расположения растительности, интенсивности движущегося автотранспорта, геометрических параметров.

Личный вклад автора: Нутерман Р.Б. под руководством профессора Старченко А.В. принимал участие в построении и реализации математических моделей турбулентности; осуществил тестирование моделей турбулентности и переноса примеси; получил основные результаты диссертационной работы и провёл их обоснование.

Основные результаты диссертации доложены соискателем на 11-ти международных, 10-ти всероссийских и 2-х региональных научных и научно-практических конференциях в Копенгагене, Кембридже, Вене, Бергене, Гамбурге, Литче, Киеве, Новосибирске, Томске и полностью представлены в следующих опубликованных работах [1-10], в том числе в 3 статьях в изданиях списка ВАК.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения; общий объем работы - 156 страниц; работа содержит 6 таблиц и 60 рисунков; список цитируемой литературы включает 139 наименований.

Краткое содержание диссертационной работы:

Во **введении** сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, обоснована его актуальность, кратко излагается содержание диссертационной работы по главам.

Первая глава посвящена общим вопросам проблемы загрязнения воздуха антропогенными выбросами, влиянию атмосферных процессов на перенос и рассеяние примеси, а также способам их математического и экспериментального моделирования. Рассматриваются подходы моделирования турбулентных течений и целесообразность применения того или иного способа описания турбулентности к расчёту течения в городской застройке. На основе обзора литературных источников представлена иерархия моделей турбулентного замыкания осреднённых уравнений Навье-Стокса, а также существующие методы задания граничных условий. Кроме того, анализируется степень влияния на течение и турбулентную структуру в уличном каньоне таких тонких эффектов, как городская растительность, движущийся автотранспорт и радиационный перенос тепла. В заключительной части главы формулируются основные требования, предъявляемые к современным микромасштабным моделям городской аэродинамики и переноса примеси: а) использование пространственно временного осреднения системы уравнений Навье-Стокса; б) применение для турбулентного замыкания современных моделей турбулентности, базирующихся на решении дифференциальных уравнений для турбулентных характеристик; в) учёт воздействия городской растительности на пространственную структуру движения воздушных масс внутри городской застройки и распространение выхлопов от автотранспорта; г) учёт влияния передвижения автотранспорта на аэродинамическую и турбулентную картину движения воздуха.

Вторая глава представляет математическую формулировку микромасштабной модели городского подслоя атмосферы, которая была построена на основании проведенного обзора литературных источников с обоснованием предпочтительности того или иного подхода. Математическая модель включает в себя осреднённые по Рейнольдсу и по объёму уравнение неразрывности и уравнения Навье-Стокса:

$$\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i} = 0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \langle \bar{p} \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\nu \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j}\right) - \frac{\partial}{\partial x_j}\langle \overline{u_i' u_j'} \rangle + FM_i + FMT_i, \qquad i,j = 1,2,3. \tag{2}$$

Здесь $\langle \bar{u}_i \rangle$ - осреднённые проекции вектора скорости на оси координат Ox_i; $\langle \bar{p} \rangle$ - давление, ρ - плотность, ν - кинематическая вязкость воздуха, $\langle \overline{u_i' u_j'} \rangle$ - тензор напряжений Рейнольдса; FM_i - функция, описывающая влияние растительности, а FMT_i - описывает влияние передвижения автотранспорта на аэродинамику.

Осреднённое транспортное уравнение для концентрации имеет вид:

$$\frac{\partial\langle\bar{c}\rangle}{\partial t}+\frac{\partial\langle\bar{u}_j\rangle\langle\bar{c}\rangle}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\nu}{Sc}\frac{\partial\langle\bar{c}\rangle}{\partial x_j}\right)-\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\langle\overline{u_j'c'}\rangle\right)+S;\ \langle\overline{u_j'c'}\rangle=-\frac{\nu_T}{Sc_T}\frac{\partial\langle\bar{c}\rangle}{\partial x_j}. \quad (3)$$

где $\langle\bar{c}\rangle$ - концентрация примеси; S - функция, описывающая распределение источников примеси, Sc - число Шмидта, а $\langle\overline{u_j'c'}\rangle$ - турбулентные потоки массы.

Замыкание системы уравнений гидродинамики проводится с использованием трёх различных моделей турбулентности:

– двухпараметрическая «$k-\varepsilon$» модель с замыкающими соотношениями Буссинеска[1] (Linear Eddy Viscosity Model, LEVM):

$$\frac{\partial\langle k\rangle}{\partial t}+\frac{\partial\langle\bar{u}_j\rangle\langle k\rangle}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\nu+\frac{\nu_T}{\sigma_k}\right)\frac{\partial\langle k\rangle}{\partial x_j}\right)+P-\langle\varepsilon\rangle+FK+FKT, \quad (4)$$

$$\frac{\partial\langle\varepsilon\rangle}{\partial t}+\frac{\partial\langle\bar{u}_j\rangle\langle\varepsilon\rangle}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\nu+\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\langle\varepsilon\rangle}{\partial x_j}\right)+\frac{\langle\varepsilon\rangle}{\langle k\rangle}\left(C_{\varepsilon1}P-C_{\varepsilon2}\langle\varepsilon\rangle\right)+ \quad (5)$$

$$FE+FET,$$

$$\nu_T=C_\mu\frac{\langle k\rangle^2}{\langle\varepsilon\rangle}, \quad (6)$$

$$a_{ij}=\frac{\langle\overline{u_i'u_j'}\rangle}{\langle k\rangle}-\frac{2}{3}\delta_{i\,j}=-\frac{\nu_T}{\langle k\rangle}S_{ij};\ S_{i\,j}\equiv\frac{\partial\langle\bar{u}_i\rangle}{\partial x_j}+\frac{\partial\langle\bar{u}_j\rangle}{\partial x_i}, \quad (7)$$

где a_{ij} - тензор анизотропии турбулентности, $\delta_{i\,j}$ - символ Кронекера; ν_T - турбулентная вязкость, $\langle k\rangle$ - кинетическая энергия турбулентности, $\langle\varepsilon\rangle$ - диссипация турбулентной кинетической энергии, $P=-\langle\overline{u_i'u_j'}\rangle\frac{\partial\langle\bar{u}_i\rangle}{\partial x_j}$ - генерация энергии турбулентности, FK, FE - функции, описывающие влияние растительности, а FKT, FET - функции, описывающие влияние передвижения автотранспорта на турбулентную кинетическую энергию и диссипацию соответственно, $\sigma_k=1{,}0, \sigma_\varepsilon=1{,}3, C_{\varepsilon1}=1{,}44, C_{\varepsilon2}=1{,}92$.

– двухпараметрическая «$k-\varepsilon$» модель турбулентности с нелинейной зависимостью тензора анизотропии турбулентности от компонент тензоров скорости деформации и завихренности[2] (Non-Linear Eddy Viscosity Model, NLEVM):

[1] Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows // Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 1974. – V. 3, № 2. – P. 269-289.
[2] Craft T.J., Launder B.E., Suga K. Development and application of a cubic eddy viscosity model of turbulence // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 1996. – V. 17. – P. 108-115.

$$a_{ij} = \langle\overline{u_i' u_j'}\rangle / \langle k\rangle - 2/3\,\delta_{ij} = \sum_{n=1}^{8} \alpha_n f_n(S_{ij}, \Omega_{ij})\,, \tag{8}$$

где функция f_n содержит квадратичные и кубические комбинации компонент тензоров S и Ω, а $\Omega_{i\,j} \equiv \frac{\partial\langle\overline{u}_i\rangle}{\partial x_j} - \frac{\partial\langle\overline{u}_j\rangle}{\partial x_i}$. Квадратичные комбинации компонентов S и Ω необходимы для описания анизотропии нормальных напряжений в простом сдвиговом течении, а кубические члены вводятся для учёта корректного воздействия кривизны линий тока и закрутки течения.

– дифференциальная модель напряжений Рейнольдса (Reynolds Stress Model, RSM):

$$\frac{D\,\langle\overline{u_i' u_j'}\rangle}{Dt} = P_{i\,j} + d_{i\,j} + \varepsilon_{i\,j} + \phi_{i\,j} + FS_{ij} + FST_{ij} \tag{9}$$

$$i, j = 1,2,3.$$

В этих уравнениях, член в левой части – отражает динамику турбулентных напряжений по времени и адвективного переноса $\langle\overline{u_i' u_j'}\rangle$, а слагаемые $P_{i\,j},\ d_{i\,j}, \phi_{i\,j}.\varepsilon_{i\,j}, FS_{ij}, FST_{ij},$ представляют собой порождение, турбулентную диффузию, корреляцию «давление-скорость деформации», диссипацию, влияние растительности и передвижения автотранспорта соответственно.

Здесь

$$d_{i\,j} = \frac{\partial}{\partial x_k}\left(\frac{\nu_T}{\sigma_k}\frac{\partial\,\langle\overline{u_i' u_j'}\rangle}{\partial x_k}\right), \sigma_k = 0{,}82, i, j = 1, 2, 3 \tag{10}$$

$$\phi_{i\,j} = \phi_{i\,j,1} + \phi_{i\,j,2}.$$

$$\phi_{i\,j,1} = -C_1\frac{\langle\varepsilon\rangle}{\langle k\rangle}\left[\langle\overline{u_i' u_j'}\rangle - \frac{2}{3}\langle k\rangle\delta_{i\,j}\right], \phi_{i\,j,2} = -C_2\left[P_{i\,j} - \frac{2}{3}P\delta_{i\,j}\right], \tag{11}$$

где $C_1 = 1{,}8, C_2 = 0{,}6,$ *а* $P_{i\,j} = -\langle\overline{u_i' u_k'}\rangle\frac{\partial\langle\overline{u}_j\rangle}{\partial x_k} - \langle\overline{u_j' u_k'}\rangle\frac{\partial\langle\overline{u}_i\rangle}{\partial x_k}, P = \frac{1}{2}P_{k\,k}, \varepsilon_{i\,j} = \frac{2}{3}\varepsilon\delta_{ij}$

Влияние городской растительности учитывается с помощью дополнительных источниковых членов в осреднённом уравнении Навье-Стокса и в транспортных уравнениях модели турбулентности (см. Таблица 1).

В таблице 1 используются следующие обозначения: η - доля поверхности, покрытой деревьями, C_d – коэффициент сопротивления, $a = a(x_3)$ - плотность растительности в лесном массиве (например, для массива сосновых деревьев η = 1, C_d = 0,2, a = 0,3125 м^2/м^3), $\beta_P \in [0, 1]$ - доля средней кинетической энергии потока, которая преобразовалась в турбулентную кинетическую энергию из-за сопротивления

растительности, а коэффициент $\beta_d \approx (1{,}0 \div 5{,}0)$ - доля диссипации $\langle k \rangle$ из-за каскадного процесса переноса турбулентности в растительности, $C_{\varepsilon 4} = 1{,}5$ - эмпирическая постоянная.

Таблица 1 – Совокупность источников в транспортных уравнениях для моделирования воздействия городской растительности

Транспортное уравнение	Источниковый член
Уравнения Рейнольдса	$FM_i = -\eta C_d a \langle \overline{u}_i \rangle \lvert \boldsymbol{V} \rvert$
Уравнение кинетической энергии турбулентности	$FK = \eta C_d a (\beta_P \lvert \boldsymbol{V} \rvert^3 - \beta_d \lvert \boldsymbol{V} \rvert \langle k \rangle)$
Уравнение диссипации кинетической энергии турбулентности	$FE = C_{\varepsilon 4} \frac{\langle \varepsilon \rangle}{\langle k \rangle} FK$
Уравнения переноса напряжений Рейнольдса	$FS_{ij} = \eta C_d a \left(\beta_P \lvert \boldsymbol{V} \rvert^3 \frac{2}{3} \delta_{ij} - \beta_d \lvert \boldsymbol{V} \rvert \langle \overline{u_i' u_j'} \rangle \delta_{ij} \right)$

Моделирование воздействия передвигающегося автотранспорта на поток воздушных масс осуществляется путём добавления источника $FMT_i = -C_{car}\left(\langle \overline{u}_i \rangle - V_{car,i}\right) Q_{car}$ в уравнения (2). Для учёта порождения кинетической энергии турбулентности за счёт движения автотранспорта в уравнение (4) добавляется к правой части следующий член $FKT = C_{car} \lvert \boldsymbol{V} - \boldsymbol{V_{car}} \rvert^2 Q_{car}$, а в уравнение (5) слагаемое, отвечающее за диссипацию механической энергии турбулентности, которое имеет вид $FET = C_{car} \lvert \boldsymbol{V} - \boldsymbol{V_{car}} \rvert^2 Q_{car} \frac{\langle \varepsilon \rangle}{\langle k \rangle}$, где $C_{car} = 0{,}0015$ - эмпирический коэффициент[3], V_{car} - скорость автомобилей, Q_{car} - число автомобилей в секунду, проходящих через заданную плоскость. В заключение следует отметить, что предсказание влияния движущегося автотранспорта на картину распределения турбулентных напряжений Рейнольдса осуществляется путём добавления слагаемого $FST_{ij} = FKT \cdot \delta_{ij} 2/3$ в уравнение (9).

Для задания значений турбулентных параметров вблизи поверхности используется метод пристенных функций Ченга-Лаундера.

В третьей главе представлена вычисленная процедура решения поставленной задачи, опирающаяся на метод конечного объема. На основе двумерного уравнения

[3] Louka P. Contribution of Petroula Louka to the TRAPOS WG-TPT meeting in Cambridge. – 2000. – Режим доступа: электронный ресурс – http://www2.dmu.dk/AtmosphericEnvironment/trapos/texte/louka-camb.pdf.

адвекции-диффузии показано, как производится дискретизация исходной дифференциальной задачи и получение ее конечно-разностного аналога. Дано описание метода согласования полей скорости и давления, необходимого при решении уравнений гидродинамики. Изложен способ решения сеточных уравнений, разностных аналогов адвективно-диффузионных уравнений, опирающийся на явный метод Булеева.

В четвертой главе представлены результаты численного предсказания ряда течений, таких как поток за обращённым назад уступом (Рисунок 1, 2), течение за отдельно стоящим деревом (Рисунок 3), а также сравнение их с экспериментальными данными[4,5] с целью выявления наиболее подходящего моделирования турбулентности для поставленной задачи. Сравнение трёх моделей показывает превосходство RSM модели над всеми остальными и, в особенности, над «$k-\varepsilon$» с градиентными замыкающими соотношениями Буссинеска. Видно, что коэффициент давления внутри рециркуляционной области предсказывается «$k-\varepsilon$» моделями хуже, чем RSM (Рисунок 1). По-видимому, вследствие этого вблизи стенки модуль рассчитанной по «$k-\varepsilon$» модели скорости при $x/h \leq 2$ имеет большее по сравнению с экспериментом значение (Рисунок 2).

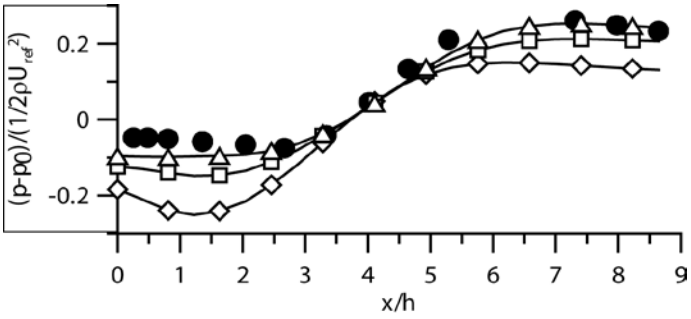

Рисунок 1 – Распределение коэффициента давления за обращённым назад уступом; -◊- - LEVM, -□- - NLEVM, -△- - RSM, ● - эксперимент[4]

Относительно моделирования локальных турбулентных параметров можно сказать, что использование «$k-\varepsilon$» модели завышает уровень кинетической энергии в застойной области течения (Рисунок 2) $x/h \leq 2$, где наблюдается вторичная рециркуляция, и недооценивает его вниз по потоку за точкой присоединения $x/h \geq 6$. Этот недостаток в значительно меньшей степени проявляется у NLEVM «$k-\varepsilon$» модели. Если сравнивать временные затраты численного расчёта, то RSM модель по этой характеристике уступает остальным двум моделям на 30-40%. Кроме того, использование RSM модели может сопровождаться локальной численной

[4] Турбулентные сдвиговые течения Т. 1.: Пер. с англ. / ред. А.С. Гиневский. – М.: Машиностроение, 1982. – 432 с.

[5] 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. – V. 9. – P. 721-722.

неустойчивостью, что, в свою очередь, является недостатком модели. Таким образом, анализ расчётов показывает, что «$k-\varepsilon$» модель с нелинейной зависимостью тензора анизотропии от компонент тензоров скорости деформации и завихренности при незначительном ухудшении качества результатов вычислений наиболее подходит для решения поставленной задачи.

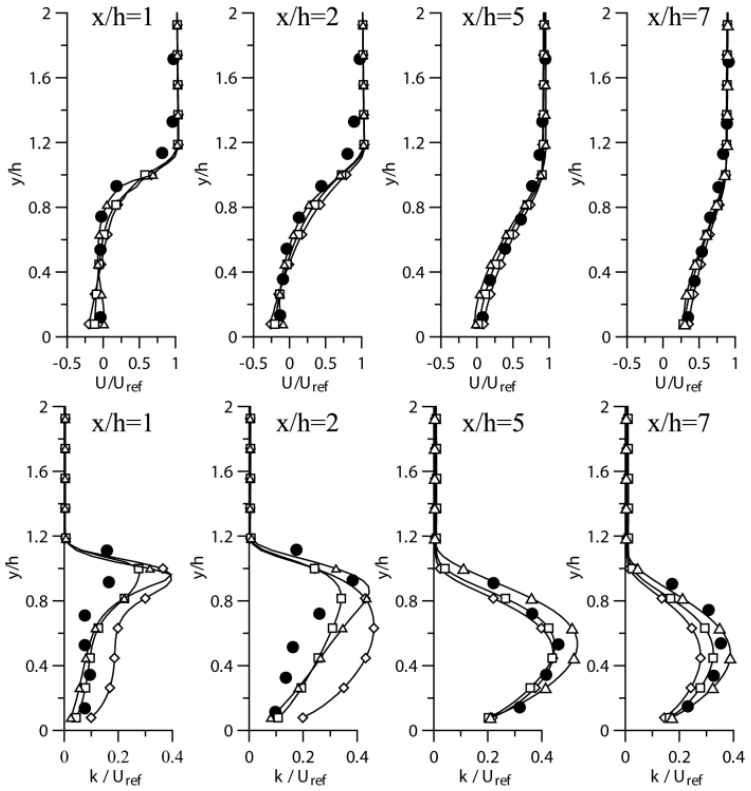

Рисунок 2 – Профили скорости (сверху) и кинетической энергии турбулентности (снизу) за уступом; -◊- - LEVM, -□- - NLEVM, -△- - RSM, ● - эксперимент[4]

С помощью предложенной модели рассчитаны характерные случаи, встречающиеся в городской застройке, такие как течение за отдельно стоящим деревом, а также распространение примеси в городском уличном каньоне в зависимости от метеорологических условий, определяемых направлением и силой ветра. Следует отметить, что предложенные параметризации растительности не дают существенного улучшения результатов моделирования при увеличении порядка замыкания турбулентности (Рисунок 3). Кроме этого, показана адекватность моделирования распределения концентрации в уличном каньоне на основе сравнения с экспериментальными данными[6] и расчётами по другим микромасштабным моделям

[6] Ketzel M., Berkowiez R., Lohmeyer A. Comparison of numerical street dispersion models with results from wind tunnel and field measurements // Environmental Monitoring and Assessment. – 2000. – V. 65. – P. 363-370.

(Рисунок 4). Эксперименты и расчёты показывают, что глобальный максимум концентрации примеси в объёме уличного каньона наблюдается с подветренной стороны.

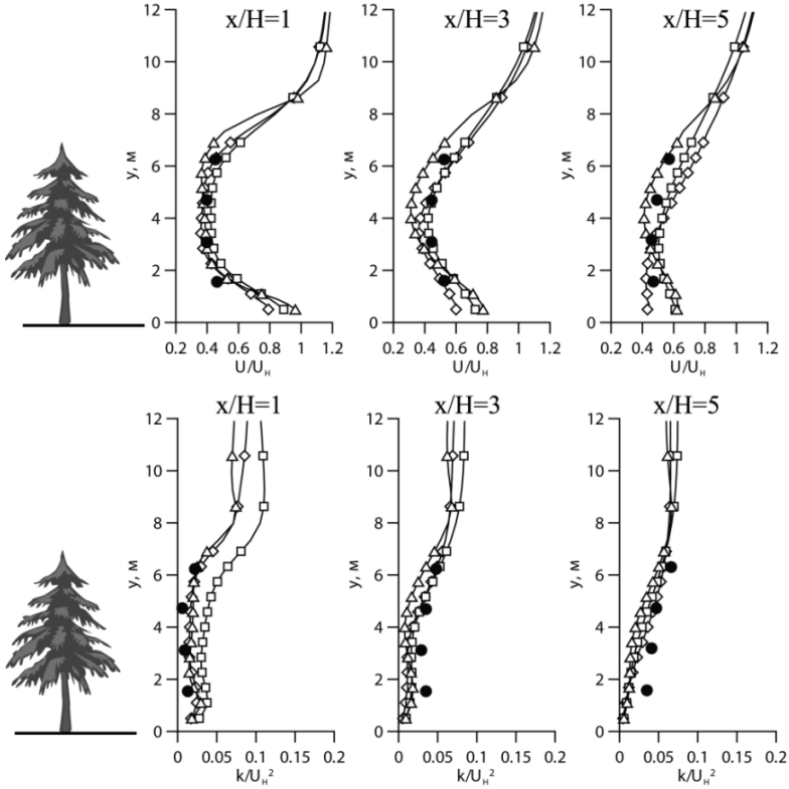

Рисунок 3 – Сравнение вертикальных профилей скорости (сверху) и кинетической энергии (снизу) за деревом. -◊- - LEVM, -□- - NLEVM, -Δ- - RSM, ● - эксперимент[5], U_H - скорость при $y=H$.

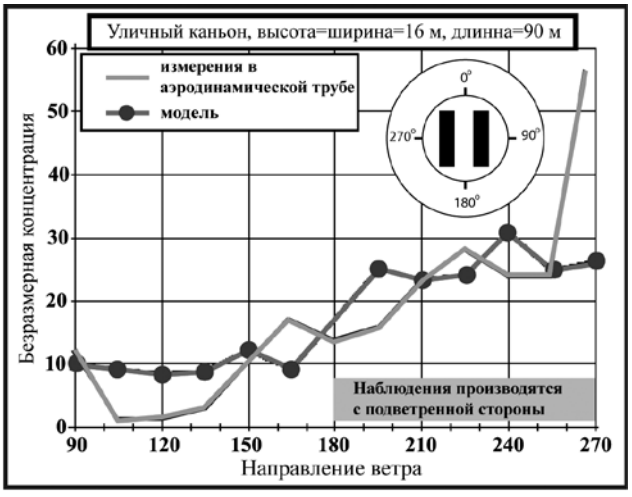

Рисунок 4 – Зависимость безразмерной концентрации от направления ветра, для расчётов использовалась NLEVM, — - эксперимент[6], -●- -расчёт

Проведён параметрический анализ течения в городском уличном каньоне для различных метеорологических и геометрических условий. Расчёты показывают, что одним из основных факторов, влияющих на загрязнённость каньона, является метеорологическая ситуация над городской застройкой. Учёт эффектов, сопряжённых с передвижением автотранспорта, говорит о том, что движущиеся автомобили способствуют интенсификации процессов перемешивания в объёме городского каньона.

Необходимо отметить, что наибольшее локальное значение концентрации загрязнителя достигается в том случае, когда источник механической турбулентности и источник примеси находятся у левой образующей каньона. Это происходит из-за того, что степень рассеяния примеси возрастает с увеличением расстояния от источника выброса, поскольку турбулентная диффузия способствует более интенсивному перемешиванию. В случае, когда источник механической турбулентности находится у левой образующей каньона, примесь в меньшей степени рассеивается и в основном выносится потоком из уличного каньона. Поэтому в нижней части каньона наблюдается более низкий уровень концентрации примеси.

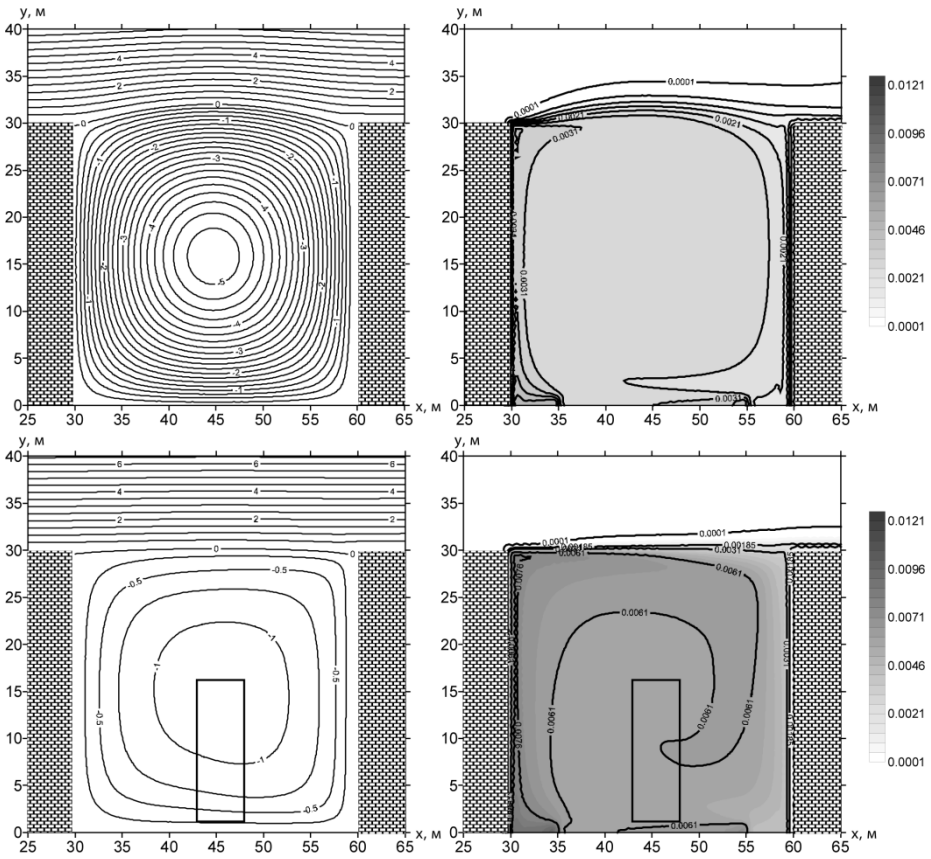

Рисунок 5 – Линии тока (слева) и изолинии концентрации примеси (справа). *W*=30 м; *H*=30 м; U_{ref}= 1 м/с; источники механической турбулентности и примеси в точках: (*x* = 35, *y* = 0,5), (*x* = 55, *y* = 0,5); □ - растительный массив

Наличие небольшого массива растительности, расположенного в центре уличного каньона (Рисунки 5; 42,5м≤*x*≤47,5м; 1м≤*y*≤16м), приводит к существенному снижению скорости вращательного движения из-за увеличения сопротивления потоку. Кроме того, появление проницаемого 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 каньона, особенно, у подветренной стороны.

Результаты расчётов течения вокруг протяженного здания показывают, что в потоке образуются две обширные рециркуляционные зоны: внизу у наветренной стороны здания и над зданием вниз по потоку (Рисунок 6). Наибольшие значения концентрации газообразной примеси наблюдаются, 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 так же благодаря вихревому движению, из-за которого примесь постоянно циркулирует в этой области течения и выносится из неё лишь частично. Если же источник загрязнения находится вверх по потоку (вне области рециркуляции), то это приводит к более интенсивному рассеиванию примеси над зоной рециркуляции, т.к. на данном участке течения турбулентная диффузия велика.

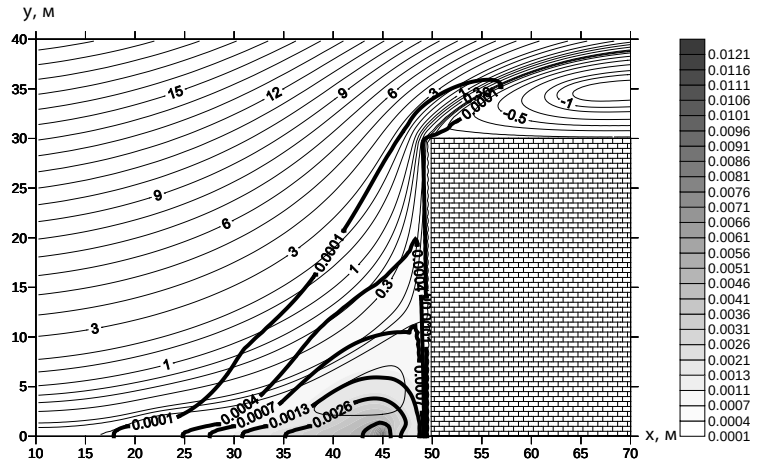

Рисунок 6 – Линии тока и изолинии концентрации примеси. U_{ref}= 1 м/с. Источник загрязнения в точке (*x* = 45 м, *y* = 0,5)

Наличие ограниченной зоны растительности перед зданием приводит к изменению аэродинамической картины течения. Проницаемая преграда стабилизирует набегающий поток и тем самым предотвращает условия образования обширной зоны рециркуляции течения перед зданием. Вследствие этого, примесь, в основном, выносится вертикальным потоком и размеры области ее рассеяния становятся существенно меньше.

Пятая глава посвящена расчёту и анализу процессов, а также изучению применимости различных схем турбулентных замыканий для пространственных течений, которые характерны для городской застройки: обтекание кубического параллелепипеда, лежащего на плоскости, и двух кубов, расположенных последовательно вдоль основного направления потока. Проанализировано влияние нестационарных эффектов на структуру среднего поля и турбулентных характеристик потока. Выявлено, что чем выше уровень схемы замыкания турбулентности, тем более чувствительна модель к нестационарным эффектам.

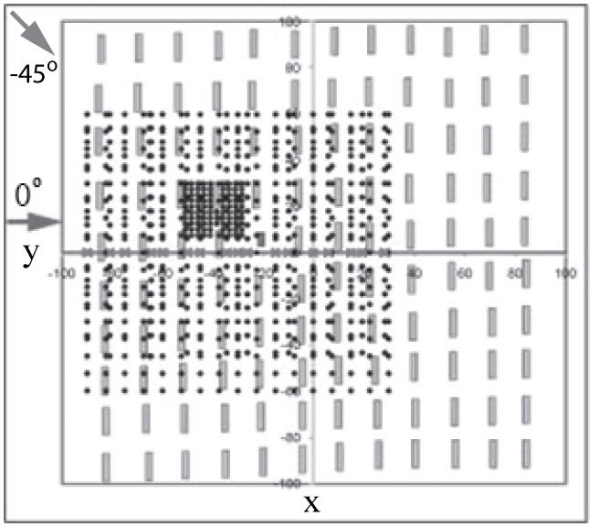

Рисунок 7 – Геометрия расчётной области MUST (массив из 120 контейнеров); • - расположение точек, в которых проводились измерения

Выполнены исследования аэродинамики небольшого участка реальной городской застройки – улицы Гётиннгер в городе Ганновер, а результаты вычислений проверены на основе экспериментальных данных.

Чтобы провести исследование поведения модели в городском подслое атмосферы и изучить характерную для города картину турбулентного движения, использовался набор данных MUST[7] (Mock Urban Setting Trial) эксперимента (Рисунок 7). Его суть заключается в экспериментальном моделировании городского пограничного слоя посредством обтекания массива контейнеров в аэродинамической трубе под разными углами - 0^o и -45^o. Сравнение расчётных данных, полученных по различным моделям, с экспериментом говорит о том, что всегда имеет место недооценка кинетической энергии турбулентности, а также вертикальной компоненты вектора скорости (Рисунок 8).

Сопоставление предложенной модели с пакетом вычислительной гидродинамики FLUENT (сопоставление расчётов представлено для «$k-\varepsilon$» модели с замыкающими соотношениями Буссинеска) показывает, что в большинстве случаев FLUENT лучше предсказывает структуру течения. Это происходит отчасти из-за того, что в FLUENT используется блочно-структурированная сетка, а в разработанной модели применяется

[7] Bezpalcova K., Harms F. EWTL data report / Part I: summarized test description Mock Urban Setting Test. Environmental Wind Laboratory, Center for Marine and Atmospheric Research, University of Hamburg. – 2005. – P. 11.

прямоугольная расчётная сетка и метод фиктивных областей. А так как контейнеры в MUST эксперименте располагаются не в полной мере упорядоченно, то FLUENT корректнее описывает геометрию расчётной области. Тем не менее, в некоторых областях FLUENT показывает строгую недооценку параметров потока, например, кинетической энергии турбулентности или вертикальной компоненты скорости (Рисунок 8).

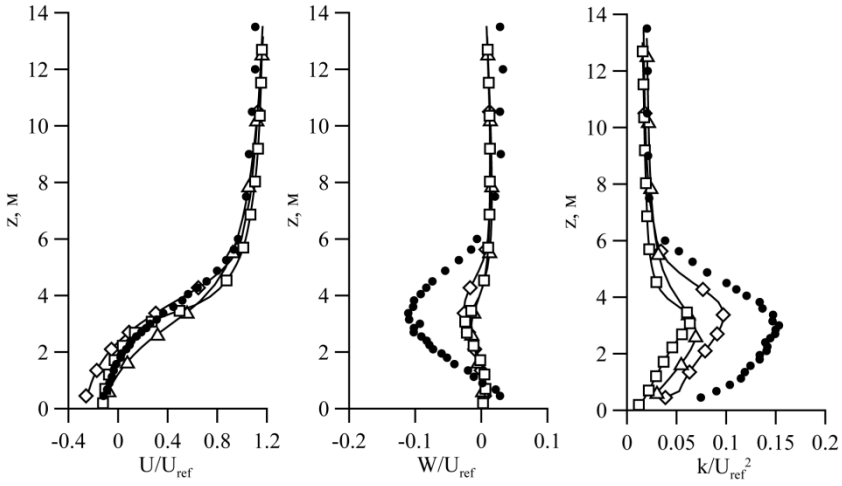

Рисунок 8 – Вертикальные профили компонент вектора скорости *U*, *W* и кинетической энергии турбулентности при направлении ветра 0^o; координаты сечения $x = -76,0$ м, $y = 3,0$ м; -◊- - расчёт FLUENT; -△- - расчёт LEVM; -□- - расчёт NLEVM; ● - данные измерений[7]

Результаты моделирования и эксперимента сопоставлялись не только на основе графического представления информации, но и с помощью системы показателей, которая чаще всего используется для оценки эффективности разномасштабных метеорологических моделей и является общепринятой в мире[8]:

Среднеквадратичная ошибка (Normal Mean Square Error)

$$NMSE = \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i P_i)},$$

Относительная ошибка (Fractional Bias)

$$FB = \frac{(\bar{O} - \bar{P})}{0{,}5(\bar{O} + \bar{P})}, \bar{O} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} O_i, \bar{P} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} P_i$$

Коэффициент корреляции (Correlation coefficient)

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n}[(O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})]}{[\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2]^{1/2}[\sum_{i=1}^{n}(P_i - \bar{P})^2]^{1/2}}$$

[8] Santiago J.L., Martilli A. CFD simulation of airflow over a regular array of cubes. Part I: Three dimensional simulation of the flow and validation with wind-tunnel measurements // Boundary-Layer Meteorology. – 2007. – V. 122. – P. 609-634.

и

$$\text{FAC2} = \text{доля данных, которые удовлетворяют соотношению}$$

$$0{,}5 \le \frac{P_i}{O_i} \le 2{,}0,$$

где P_i - означает предсказанную по модели величину, O_i - обозначает измеренную величину, а черта сверху $(\bar{P})$ символизирует осреднение по набору данных.

Коэффициент успеха (Hit rate)

$$q = \frac{N}{n} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} N_i\,, N_i = \begin{cases} 1, \text{для } \left|\frac{P_i - O_i}{O_i}\right| \le D \text{ или } |P_i - O_i| \le W, \\ 0, \text{иначе,} \end{cases}$$

где N - количество точек, в которых проводилось сравнение данных, D - допустимая относительная погрешность и W - допустимая абсолютная погрешность. Принято считать, что модель удовлетворительно предсказывает атмосферные процессы, если описанные выше величины удовлетворяют соотношениям: $FAC2 \ge 0{,}5$, $|FB| < 0{,}3$, $NMSE < 4$, $q \ge 0{,}66$, $R > 0{,}5$.

Расчёты показывают, что для направления движения воздушных масс 0^o продольная составляющая вектора скорости U/U_{ref} имеет величину $q > 0{,}66$. Однако, анализ сравнения набора расчётных и экспериментальных данных величины W/U_{ref} на основе критерия q говорит о значительном несоответствии расчёта и эксперимента в некоторых областях (Таблица 2). Тем не менее, значение коэффициента корреляции R указывает на то, что модель в целом способна удовлетворительно воспроизводить поле средней скорости. Если посмотреть на рисунок 8, то становится ясно, что недооценка W происходит в основном внутри массива контейнеров.

Таблица 2 – Система показателей для вертикальных профилей скорости и кинетической энергии турбулентности, направление ветра 0°, модель турбулентности «$k-\varepsilon$» с замыкающими соотношениями Буссинеска

	Количество точек	*W*	*D*	*R*	*q*	*FAC2*	*FB*	*NMSE*
U	566	0,008	0,25	0,832	0,70318	0,897527	-	-
W	566	0,007	0,25	0,5917	0,166078	0,167845	-	-
K	566	0,005	0,25	0,3924	0,432862	0,787986	0,381555	0,349436

Из приведённой системы показателей также следует, что существует строгая недооценка k/U_{ref}^2 (параметр FB), однако *FAC2* показывает, что доля таких данных всегда меньше 35 % от общего количества.

В заключительной части раздела изучалось течение вдоль одной из центральных улиц города Томск – проспекта Ленина. Для проведения расчётов было выбрано юго-

западное направление ветра, которое обозначено стрелкой на рисунках. Выбор такого направления обусловлен тем, что преобладающие ветра над Томском и Томским районом – юго-западные в летний период и северо-восточные в зимний. Таким образом, исследуемая область включает здания различной конфигурации и этажности. Расположение автодорог указано чёрными линиями на рисунке 9 (справа).

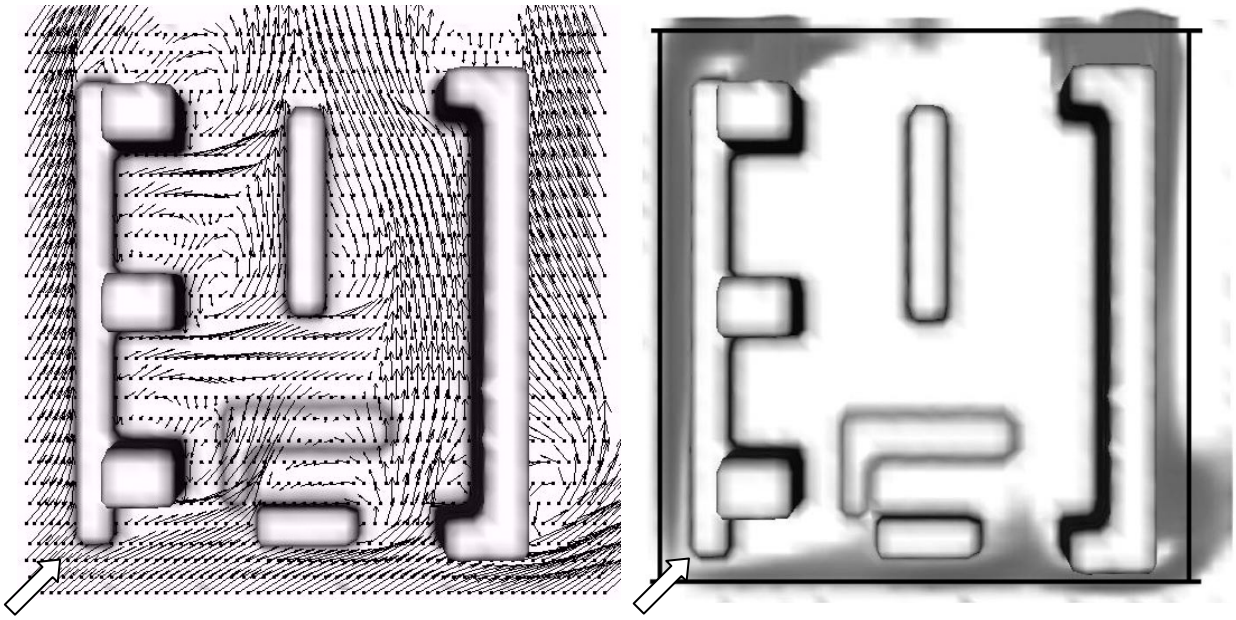

Рисунок 9 – Векторное поле скорости (слева) и контурные линии концентрации (справа) для участка Томска, $z = 1,5$ м

Вычисления показывают, что максимумы концентрации выхлопов автотранспорта располагаются вдоль дорог, однако в приземной области наблюдается увеличение локальных максимумов в районе вторичных вращательных движений воздушных масс вниз по потоку рядом с высотными зданиями. Это объясняется тем, что вращательное движение воздуха вовлекает примесь с наветренной стороны и удерживает её у подветренной стороны зданий. В целом видно, что для данного аэродинамического режима выбросы от автотранспорта не проникают внутрь рассматриваемого квартала городской застройки, а максимумы концентрации фиксируются возле автотрасс.

В заключении приведены основные выводы по результатам диссертационного исследования.

1. Для исследования аэродинамики и переноса примеси в городской застройке разработана нестационарная пространственная микромасштабная модель, опирающаяся на использование дифференциальных моделей турбулентности и

учитывающая влияние городской растительности и движущегося автотранспорта.

2. Численная реализация предложенной микромасштабной модели осуществляется на основе метода конечного объёма, неявных монотонизированных разностных схем первого порядка аппроксимации по времени и до второго по координатам.
3. Тестирование предложенной математической модели и численного метода решения проведено на экспериментальных и расчётных данных других авторов. На основании выполненных вычислительных экспериментов и результатов сравнительного анализа можно говорить об адекватности предложенной модели исследуемым физическим процессам.
4. На основе проведённого параметрического анализа для двумерной модели уличного каньона исследовано влияние геометрических размеров, метеорологических факторов, наличия и размеров массивов растительности и местоположения, а также интенсивности движущегося в уличном каньоне автотранспорта. Показано, что одним из основных факторов, влияющих на загрязнённость каньона, является метеорологическая ситуация над городской застройкой. Кроме того, расположение источников выбросов загрязнения на дне каньона также является существенным. Показано, что городская растительность оказывает стабилизирующий эффект на турбулентный поток, т.е. в относительно изолированных областях, таких как уличный каньон, имеет место значительное уменьшение скорости и уровня турбулентности, что несомненно, сказывается на проветриваемости и процессах, связанных с турбулентным рассеиванием. Учёт эффектов, сопряжённых с передвижением автотранспорта, говорит о том, что движущиеся автомобили способствуют интенсификации процессов перемешивания в объёме городского каньона.
5. Выполнены расчёты пространственных турбулентных вихревых течений вокруг плохообтекаемых прямоугольных препятствий, которые позволили на основе сравнения с экспериментальными и рассчитанными по FLUENT данными выявить слабые и сильные стороны выбранных схем замыкания. Предложена и апробирована методика оценки адекватности микромасштабной модели на основе статистических параметров, полученных расчётным путём и экспериментально.

6. Предложенная микромасштабная модель была применена для расчёта турбулентного течения и переноса примеси для реальных участков городской застройки городов Ганновер и Томск. Результаты численного анализа позволили определить районы уличных каньонов, подверженные наибольшей экологической опасности.
7. Материалы проведенных исследований включены в программу специального курса лекций, читаемого на механико-математическом факультете ТГУ.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Нутерман Р.Б., Старченко А.В. Моделирование движения воздуха в уличном каньоне // Оптика атмосферы и океана. – 2003. – Т. 14, № 4. – С. 308-314.

2 Nuterman R.B., Starchenko A.V. A modeling of air flow in a street canyon // Proceedings of SPIE. – 2004. – V. 5396. – P. 89-98.

3 Nuterman R.B., Starchenko A.V. A numerical simulation of air flow in urban obstructions // Abstracts of NATO Advanced Study Institute "Flow and Transport Processes in Complex Obstructed Geometries: from cities and vegetative canopies to industrial problems". – Kiev, 2004. – P. 151–152.

4 Нутерман Р.Б., Старченко А.В. Моделирование распространения загрязнения воздуха в уличном каньоне // Оптика атмосферы и океана. – 2005. – Т. 18, № 8. – С. 649-657.

5 Нутерман Р.Б., Старченко А.В. Математическая модель аэродинамики и переноса примеси в элементах городской застройки // Материалы конференции «Измерения, моделирование и информационные системы для изучения окружающей среды» / ред. Е.П. Гордов. – Томск: Изд. Томского ЦНТИ, 2006. – С. 71-75.

6 Нутерман Р.Б., Старченко А.В. Расчёт движения воздуха и переноса примеси в уличном каньоне // Труды постоянно действующей научно-технической школы-семинара студентов, аспирантов и молодых специалистов "Информационные системы мониторинга окружающей среды" / ред. А.М. Кориков. – Томск, 2006. – Т. 3. – С. 28-34.

7 Нутерман Р.Б., Старченко А.В. Пространственная модель для прогноза распространения выбросов автотранспорта в элементах городской застройки // Оптика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 20, № 10. – С. 917-921.

8 Nuterman R., Baklanov A. Overview and application of obstacle resolved models for air flow and pollution transport simulation: Scientific Report, 07-03 / Danish Meteorological Institute. – Copenhagen. – 2007. – P. 36. – Режим доступа: электронный ресурс – http://www.dmi.dk/dmi/sr07-03.pdf.

9 Nuterman R.B., Starchenko A.V., Baklanov A.A. Microscale model for urban environment: DMI Scientific Report, 07-04 / Danish Meteorological Institute. – Copenhagen. – 2007. – P. 47-51. – Режим доступа: электронный ресурс – http://www.dmi.dk/dmi/sr07-04.pdf.

10 Нутерман Р.Б., Старченко А.В., Бакланов А.А. К вопросу о выборе турбулентной схемы замыкания для микромасштабных моделей городского атмосферного пограничного слоя // Четвёртая Сибирская школа-семинар по параллельным и высокопроизводительным вычислениям / ред. проф. А.В. Старченко. – Томск: Дельтаплан, 2008. – С. 209-217.

Тираж 100 экз.
Отпечатано в КЦ «Позитив»
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36