

УДК 532.2:519.7

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА И РАССЕЯНИЯ ВОЗДУШНЫМ ПОТОКОМ ОТРАБОТАННЫХ ГАЗОВ АВТОТРАНСПОРТА НАД ТЕРРИТОРИЕЙ ГОРОДСКОГО КВАРТАЛА

М.Г. Бояршинов, Д.С. Балабанов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Для описания поля концентрации отработанных газов автомобилей в атмосферном воздухе городского квартала используется система дифференциальных уравнений Эйлера (неразрывности, движения, энергии и состояния) в частных производных с соответствующими краевыми условиями. Численное решение базируется на методе крупных частиц (методе Давыдова). Вычислительный эксперимент позволил определить распределение основных газодинамических характеристик потока газозвушной смеси и распределение концентрации угарного газа, входящего в состав отработанных газов, в сложной пространственной области.

Ключевые слова: газовая динамика, система уравнений Эйлера, концентрация газовой примеси, загрязнение урбанизированной территории

COMPUTATIONAL SIMULATION OF TRANSFER AND DISPERSION OF AUTOMOBILE TRANSPORT EXHAUST GASES BY THE AIRFLOW OVER THE URBAN QUARTER TERRITORY

M.G. Boyarshinov and D.S. Balabanov

Perm State National Research Polytechnical University, Perm, Russia

To describe the concentration fields of automobile exhaust gases in the city atmospheric air, the system of Euler differential equations (continuity, motion, energy, and state) in partial derivatives with appropriate boundary conditions is used. The numerical solution is based on the large-particle method (Davydov's method). The computational experiment allows us to determine the distribution of the main gas-dynamic characteristics of a gas-air mixture flow and the distribution of concentration of carbon monoxide that is a common constituent of the exhaust gas over a complex spatial area.

Key words: gas dynamics, Euler equations, impurity concentration, pollution in urban territories

Рост автомобильного парка выдвинул автотранспорт на одно из первых мест среди источников загрязнения городского воздушного пространства. Загрязняющие вещества, присутствующие в составе отработанных газов двигателей внутреннего сгорания (оксид углерода, диоксид серы, оксиды азота, углеводороды и прочие), являются опасными для жизнедеятельности человека, что обуславливает необходимость исследования распределения их концентрации над урбанизированной территорией. В работах [1–12] рассматриваются модели, с различной степенью достоверности описывающие перенос и рассеяние загрязняющих веществ от подвижных источников, в том числе над городской территорией. Однако в них, как правило, не учитываются скорость и направление ветра, рельеф местности, застройка территории зданиями и сооружениями, рассеяние и плавучесть газозвушной смеси за счет диффузии, изменения ее плотности и температуры, особенности организации транспортных потоков на городских магистралях, случайный характер появления автомобилей на улицах города и целый ряд других факторов.

В настоящей работе рассматривается перенос и рассеяние над территорией городского квартала оксида углерода, входящего в состав отработанных газов автомобильного транспорта. Исследование такого процесса осложнено необходимостью учета элементов улично-дорожной планировки и характера застройки (расположения дорог и зданий, высоты и типа строений), направления и скорости движения воздушных масс, случайного характера появления автомобилей на проезжей части, нестационарности транспортных потоков и прочих факторов. В свою очередь, интенсивность транспортных потоков зависит от местонахождения городского квартала, расположения скоростных и транзитных дорог, особенностей размещения промышленных предприятий, автохозяйств, бензозаправочных станций и станций техобслуживания в рассматриваемом квартале и прилежащих к нему районах. Типичная схема застройки и транспортно-дорожной сети городского квартала показана на рисунке 1.

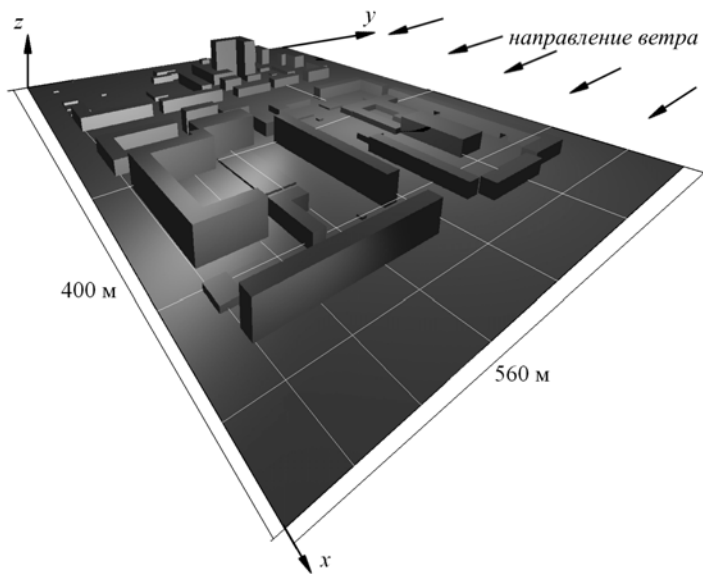


Рис. 1. Сеточная модель исследуемого городского квартала

В начальный момент времени в рассматриваемой области известны температура, плотность и давление воздуха, поле скорости движения воздушных масс. Поток транспортных средств моделируется как множество отдельных подвижных точечных источников загрязняющей примеси. Каждый точечный источник с известными значениями интенсивности и мощности эмитирует поток газа, содержащий пассивную газовую примесь. Скорость движения точечных источников, а также их количество задаются в соответствии с данными натурных наблюдений [12] за движением транспортного потока на рассматриваемых участках улиц городского квартала.

Выбрасываемый подвижными точечными источниками газ смешивается с воздухом, и полученная газозвушная смесь, увлекаемая воздушными потоками, переносится между зданиями и сооружениями. В общем случае на перенос и рассеяние газовой примеси оказывает влияние ее плотность. Кроме того, выбрасываемые автомобилем отработанные газы имеют более высокую температуру (и, соответственно, более низкую плотность по сравнению с атмосферным воздухом), что обеспечивает подъем газовой примеси в воздушном потоке за счет положительной плавучести отработанного газа. В то же время многие газы, входящие в состав выхлопных газов автомобильного транспорта, обладают удельным весом, превышающим удельный вес воздуха. Вследствие этого за счет отрицательной плавучести остывающая газовая примесь концентрируется в нижних слоях воздушного потока. Для учета указанного фактора используется приближение Буссинеска, согласно которому при малой концентрации C и малом отклонении температуры T газовой примеси от среднего значения температуры воздушного потока применяется разложение функции плотности газозвушной смеси $\rho(C, T)$ в ряд Тейлора:

$$\rho(C, T) = \rho(C_0, T_0) + \frac{\partial \rho(C_0, T_0)}{\partial C} (C - C_0) + \frac{\partial \rho(C_0, T_0)}{\partial T} (T - T_0) = \rho_0 + \alpha C + \beta (T - T_0), \quad (1)$$

где $C_0 = 0$, ρ_0 , T_0 — начальные концентрация, плотность и температура газовой смеси, $\alpha = \partial\rho(C_0, T_0)/\partial C$ — концентрационный коэффициент плотности, $\beta = \partial\rho(C_0, T_0)/\partial T$ — температурный коэффициент объемного расширения газа.

С учетом этого математическая постановка задачи исследования переноса и рассеяния воздушным потоком отработанных газов автомобильного транспорта в сложной пространственной области включает в себя систему дифференциальных уравнений [13]

– неразрывности

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{V}) = m\delta(\mathbf{r}_s), \quad (2)$$

– движения

$$\frac{\partial(\rho\mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{V}\mathbf{V}) + \nabla p = \mathbf{g}[\alpha C + \beta(T - T_0)] + m\mathbf{V}_m\delta(\mathbf{r}_s), \quad (3)$$

– полной удельной энергии

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U\mathbf{V}) + \nabla \cdot (p\mathbf{V}) = -\nabla \cdot (P_g \mathbf{V}) + e\delta(\mathbf{r}_s), \quad (4)$$

– состояния

$$\rho(k-1)(U - \mathbf{V}\mathbf{V}/2) - p = P_g. \quad (5)$$

Для исследования концентрации отдельных компонентов газовой смеси система уравнений (2)–(5) дополняется уравнением концентрации, записанным в диффузионном приближении:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (C\mathbf{V}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla C) + q\delta(\mathbf{r}_s). \quad (6)$$

Здесь обозначено: \mathbf{V} — вектор скорости воздушного потока; \mathbf{r}_s — радиус-вектор положения точечного источника; \mathbf{g} — ускорение свободного падения; U — полная удельная энергия газовой смеси; P_g — гидростатическое давление в воздушном потоке; p — отклонение действительного атмосферного давления от гидростатического; k — показатель адиабаты; e — мощность точечного источника; m — массовый расход отработанного газа, имеющего скорость \mathbf{V}_m ; q — интенсивность поступления газовой примеси из источника; λ — коэффициент диффузии примеси; $\delta()$ — дельта-функция Дирака.

Построение разрешающих соотношений для численного решения системы дифференциальных уравнений (2)–(6) осуществляется на основе метода Давыдова (метода крупных частиц [14]). В разработанном на их базе комплексе программ [15] применяется технология параллельного программирования OpenMP. Комплекс прошел верификацию на точных решениях задач исследования движения потока сжимаемого вязкого нетеплопроводного газа [16] и переноса и рассеяния газовой примеси от подвижного точечного источника [10].

Численное решение задачи исследования движения воздушных масс, переноса и рассеяния отработанных газов автотранспорта в атмосферном воздухе над урбанизированной территорией находилось для квартала, сеточная модель которого показана на рисунке 1. Для получения достоверной качественной и количественной картины распределения концентрации газовой примеси от автотранспорта учитывался режим работы светофоров. Транспортные потоки по магистралям описывались моделью случайного процесса пуассоновского типа [17].

Вычислительный эксперимент выполнен для области с размерами $560 \times 400 \times 66$ м; аппроксимирующая разностная сетка содержала 14,8 миллиона расчетных ячеек. Шаг по времени составлял 10^{-3} с. Метеоусловия полагались нормальными: температура воздуха 275 К, на уровне поверхности $z=0$ атмосферное давление 10^5 Па, плотность $1,2 \text{ кг/м}^3$; коэффициенты диффузии $\lambda_x = \lambda_y = 67 \text{ м}^2/\text{с}$, $\lambda_z = 26 \text{ м}^2/\text{с}$ (что соответствует классу «С» устойчивости атмосферы [18]). На входной границе $y = y_{\max}$, а также на боковых ($x = 0$, $x = x_{\max}$) и верхней ($z = z_{\max}$) границах поддерживались значения компонент вектора скорости ($V_x = 0$, $V_y = 0$, $V_z = -6,0 \text{ м/с}$), плотности ($1,2 \text{ кг/м}^3$), энергии (соответствовала температуре 275 К), концентрации ($C = 0 \text{ кг/м}^3$), отклонения давления ($p = 0 \text{ Па}$) и направление ветра (см. Рис. 1). На выходной границе $y = 0$ задавались условия переноса всех искомых величин: $\partial V_x / \partial x = 0$, $\partial V_y / \partial x = 0$, $\partial V_z / \partial x = 0$, $\partial \rho / \partial x = 0$, $\partial U / \partial x = 0$, $\partial p / \partial x = 0$, $\partial C / \partial x = 0$. Нижняя граница $z = 0$, а также стены и крыши городских зданий и строений моделировались условиями отсутствия скорости ($\mathbf{V} = 0$), потоков плотности, концентрации и энергии через эти границы. В начальный момент времени в рассматриваемой области (Рис. 1) задавались распределения компонент вектора скорости, плотности, энергии, давления и концентрации, соответствующие значениям на входной границе. Принималось, что каждый подвижный точечный источник эмитирует поток отработанных газов, содержащий угарный газ с плотностью $1,3 \text{ кг/м}^3$, интенсивностью $0,12 \text{ г/с}$ [19] и температурой 355 К.

На рисунках 2–4 представлены распределения изолиний скорости воздушного потока в характерных сечениях исследуемой области. Рисунки свидетельствуют, что воздушный поток, встречая на своем пути препятствие в виде городских построек, обтекает их как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Это существенно отличает разработанную пространственную модель от двумерных аналогов.

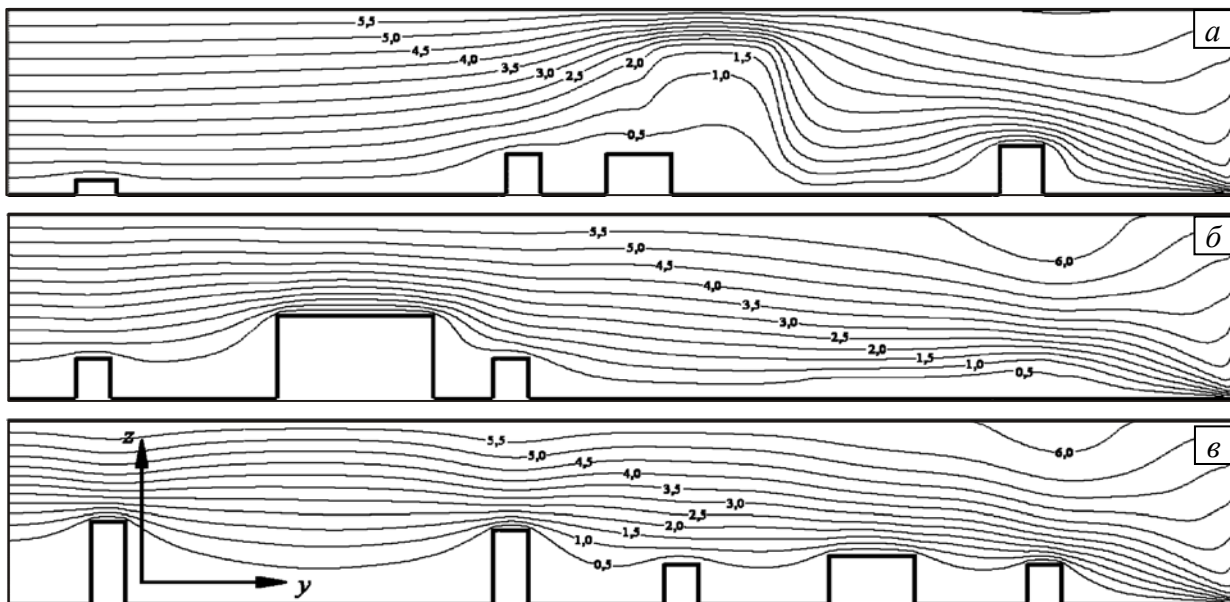


Рис. 2. Скорость газовой смеси (м/с) в сечениях x , м: 100 (а), 300 (б), 400 (в)

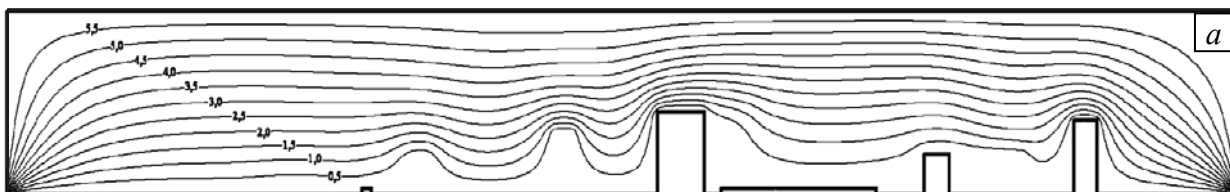


Рис. 3. Скорость газовой смеси (м/с) в сечениях y , м: 100 (а), 200 (б), $y = 300$ (в)

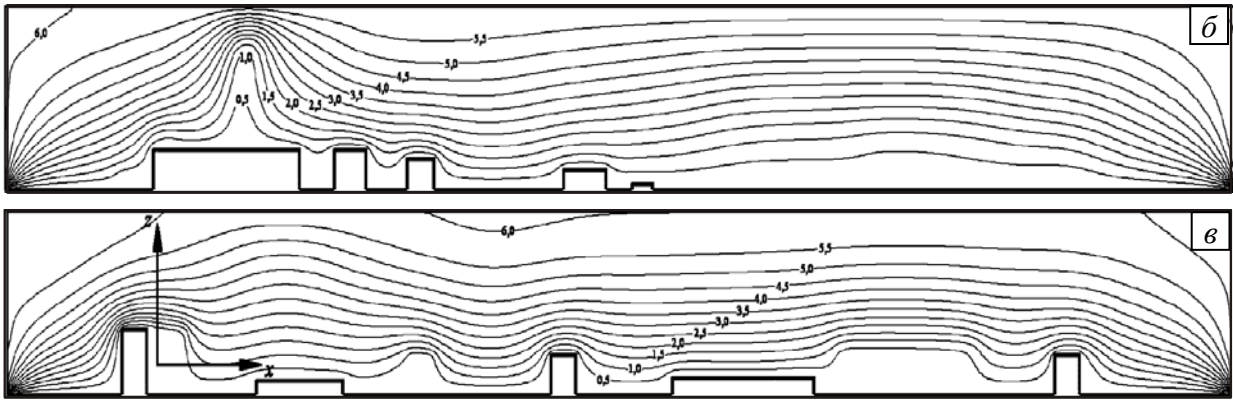
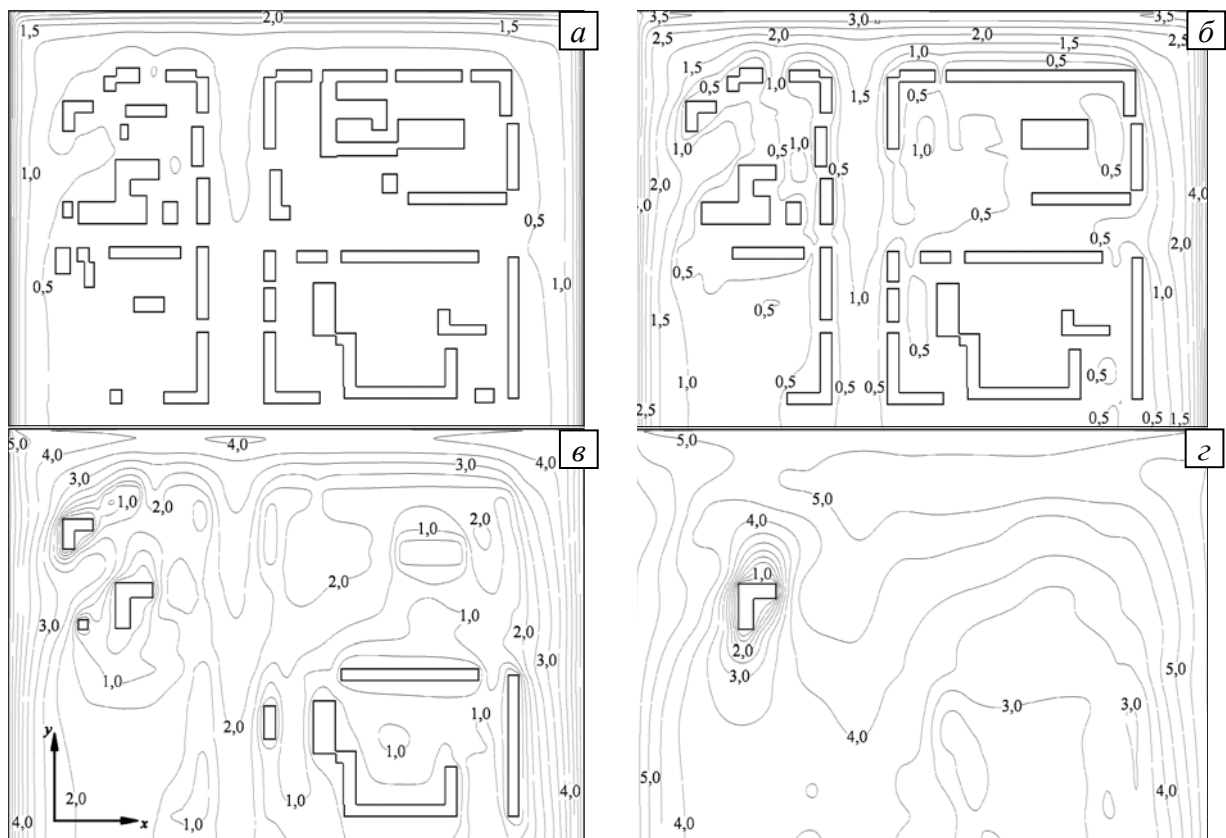


Рис. 3. Продолжение

На открытых участках городского квартала (на улицах, вдоль которых перемещаются воздушные массы, больших территориях без застроек, а также в тоннелях–путепроводах под домами, узких проходах между постройками) воздушный поток обладает большей скоростью, чем поток, движущийся внутри дворов и в областях плотной застройки. Отмечается наличие застойных зон с подветренной стороны зданий (Рис. 2–4) и в зонах плотной застройки (Рис. 2, в; 3, б; 4), градиенты скорости с наветренной стороны и над крышами зданий (Рис. 2, а, в; 4, б, в, г).

С ростом вертикальной координаты наблюдается увеличение скорости воздушного потока (Рис. 4). Это обусловлено как граничными условиями на подстилающей поверхности, так и тем, что на верхних уровнях городского квартала имеются значительные области, свободные от построек (зоны свободного движения воздушных масс). Результаты расчета хорошо согласуются с естественным представлением об обтекании воздушным потоком препятствий (зданий и сооружений).

Рис. 4. Скорость газовой смеси (м/с) в сечениях z , м: 5 (а), 10 (б), 20 (в), 40 (г)

Поля концентраций угарного газа в городском квартале представлены на рисунках 5–7. Угарный газ благодаря переносу и рассеянию воздушным потоком распространяется практически по всей пространственной области. Застройка исследуемого городского квартала оказывает определяющее влияние на его рассеивание.

Городские здания и сооружения, расположенные вдоль транспортных магистралей, препятствуют прониканию загрязнений в воздушную среду дворовых территорий (Рис. 5, 6). Лишь небольшие объемы примесей, увлекаемые воздушным потоком, переносятся внутрь квартала через тоннели–путепроводы домов и проходы между постройками. Относительно высокая концентрация выхлопных газов (в данном случае угарного газа) от потока транспортных средств наблюдается вблизи построек со стороны проезжих частей квартала (Рис. 7, б–з). Наибольшая же концентрация угарного газа, как показывают расчеты, сосредоточена в приземных слоях в непосредственной близости от транспортных магистралей (Рис. 6 и 7, а, б). С увеличением высоты концентрация загрязняющего вещества существенно понижается (Рис. 7).

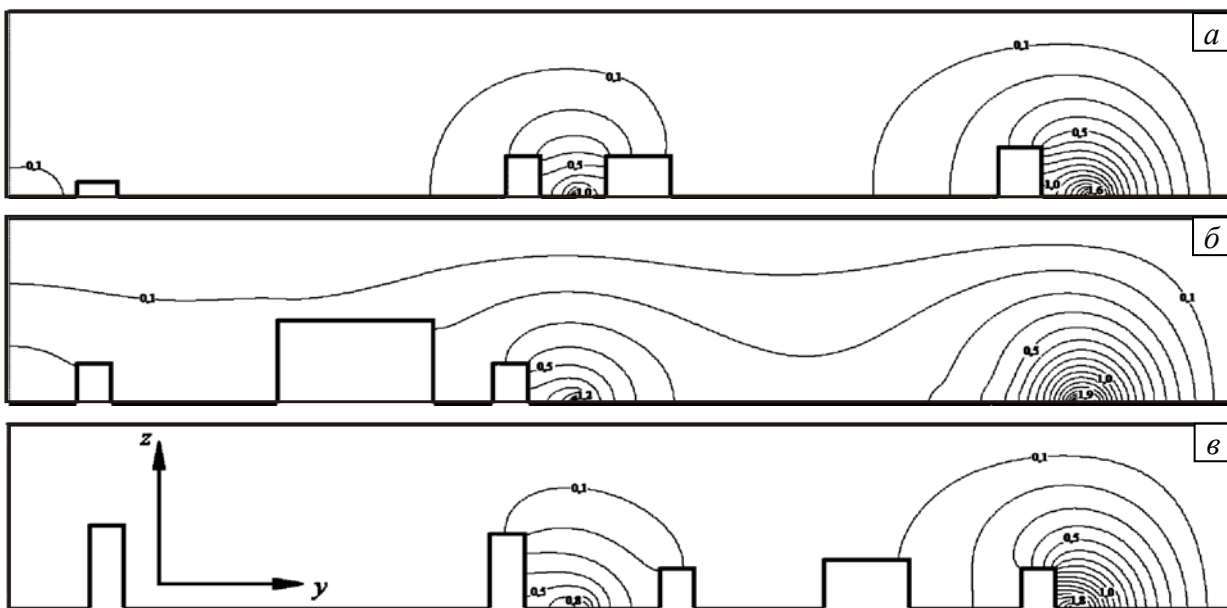


Рис. 5. Концентрация угарного газа (мг/м^3) в сечениях x , м: 100 (а), 300 (б), 400 (в)

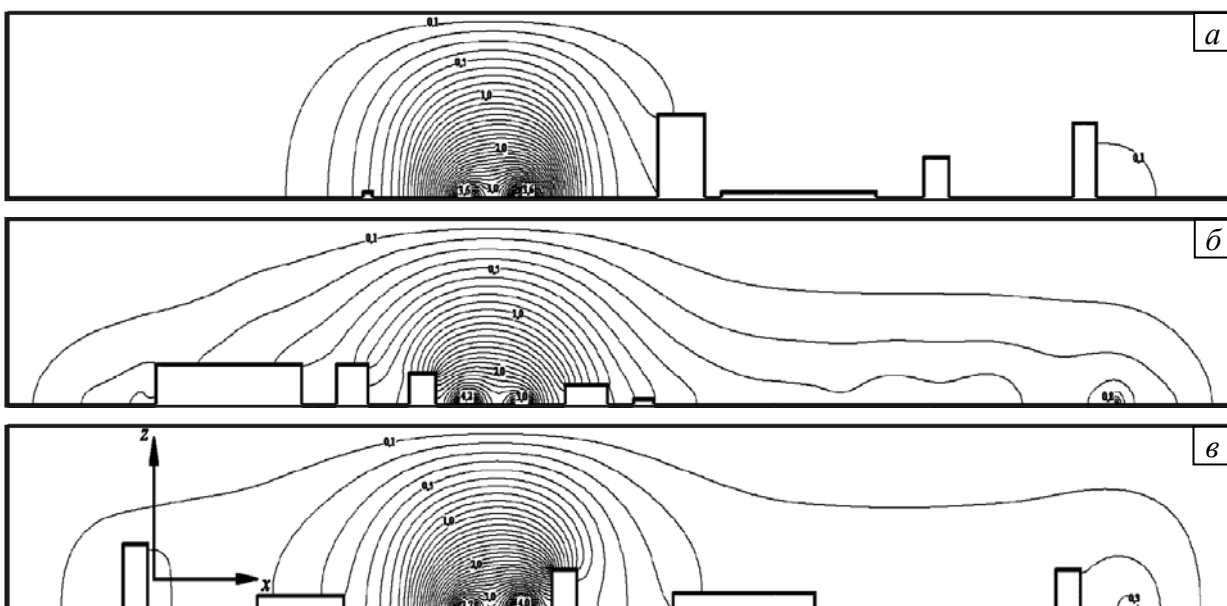


Рис. 6. Концентрация угарного газа (мг/м^3) в сечениях y , м: 100 (а), 200 (б), 300 (в)

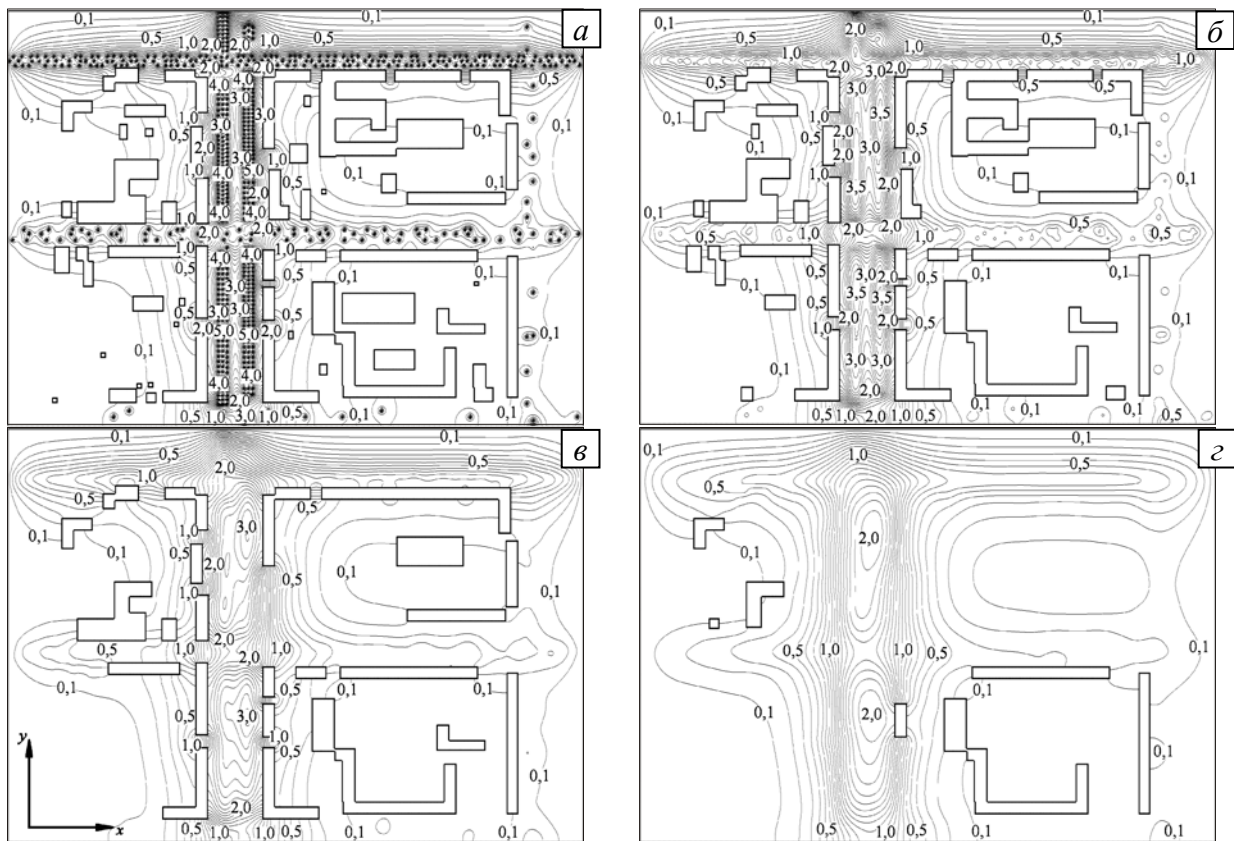


Рис. 7. Концентрация угарного газа ($\text{мг}/\text{м}^3$) в сечениях z , м: 2 (а), 5 (б), 10 (в), 20 (г)

Анализ результатов показывает, что концентрация газовой примеси (в пределах $6,0 \text{ мг}/\text{м}^3$) и повышение температуры газовой смеси от поступающих горячих отработанных газов (в пределах $7,0\text{--}10,0 \text{ К}$) можно признать малыми, что подтверждает обоснованность использования разложения (1) плотности газовой смеси в ряд Тейлора при решении в приближении Буссинеска.

Выводы

Математическая модель, базирующаяся на системе уравнений Эйлера, дополненной уравнением концентрации (диффузионное приближение), учитывала случайный характер появления автотранспорта на границах рассматриваемого квартала, а также режимы работы светофоров. Транспортные потоки описывались случайным пуассоновским процессом. Вычислительная модель, включающая перенос и рассеяние газовой примеси (на примере угарного газа) в сложной пространственной области, содержащей здания, сооружения и транспортные магистрали квартала современного города, позволила определить поля основных газодинамических характеристик потока газовой смеси и распределение концентрации газовой примеси.

Для компьютерной реализации использовался алгоритм метода Давыдова (крупных частиц), а также технология параллельного программирования OpenMP. Верификация программного комплекса осуществлялась на точных решениях задач движения потока сжимаемого вязкого нетеплопроводного газа и переноса и рассеяния газовой примеси от подвижного точечного источника.

Разработанная компьютерная модель может быть использована для создания инструментария, пригодного для объективного и обоснованного принятия решений по рационализации транспортных потоков, реконструкции дорог, проектированию и

строительству новых транспортных магистралей с целью снижения техногенной нагрузки на атмосферный воздух городской территории.

Литература

1. Волкова О.Д., Самойлова Т.С. Методология экологического нормирования нагрузок выбросов автотранспорта на лесные экосистемы // Экол. нормир.: пробл. и методы. – М., 1992. – С. 35-37.
2. Таранков В.И., Матвеев С.М. О влиянии автотранспортного загрязнения на сосновые насаждения зеленой зоны г. Воронежа. – Воронеж. лесотехн. ин-т, 1992. – 8 с. – Деп. в ВНИИЦлесресурсы 26.10.92, N 910-лх92.
3. Фельдман Ю.Г. Гигиеническая оценка автотранспорта как источника загрязнения атмосферного воздуха. – М.: Медицина. – 1975. – 160 с.
4. Chock D.P. A simple line-source model for dispersion near roadways // Atmospheric environment. Part B. – 1978. – V. 12, N. 4. – P. 823-829.
5. Csanady G.T. Crosswind shear effects on atmospheric diffusion // Atmospheric environment. Part B. – 1972. – V. 6, N. 1. – P. 221-232.
6. Kasibhatla P.S., Peters L.K., Fairweather G. Numerical simulation of transport from an infinite line source: Error analysis // Atmospheric environment. Part B. – 1988. – V. 22, N. 1. – P. 75-82.
7. Luhar A.K., Patil R.S. A general finite line source model for vehicular pollution prediction // Atmospheric Environment. Part B. – 1989. – V. 23, N. 3. – P. 555-562.
8. Peterson W.B. User's Guide for HIWAY-2: A highway air pollution model // EPA-600/8-80-018. – 1980. – P. 124.
9. Sivacoumar R., Thanasekaran K. Line source model for vehicular pollution prediction near roadways and model evaluation through statistical analysis // Environ. Pollut. – 1999. – V. 104, N. 3. – P. 389-395.
10. Бояршинов М.Г. Распределение концентрации выхлопных газов вблизи автотрассы со случайным потоком автомобилей // Инж.-физич. журнал. – 2006. – Т. 79, № 6. – С. 128-140.
11. Шатров А.В., Шварц К.Г. Численное моделирование атмосферных мезомасштабных процессов переноса примесей в окрестности города Кирова // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2010. – Т. 3, № 3. – С. 117-125.
12. Петров В.Ю., Петухов М.Ю., Якимов М.Р. Анализ режимов работы улично-дорожной сети крупных городов на примере города Перми. – Пермь: Изд. ПГТУ, 2004. – 275 с.
13. Бояршинов М.Г., Харченко А.В., Балабанов Д.С. Перенос и рассеяние воздушным потоком тяжелого нагретого газа // Вестник ИжГТУ. – 2011. – № 2. – С. 206-211.
14. Численное исследование актуальных проблем машиностроения и механики сплошных и сыпучих сред методом крупных частиц: в 5 томах / Под. ред. Ю.М. Давыдова. – М.: Национальная академия прикладных наук, 1995. – 1658 с.
15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011615085, Российская федерация. Вычислительное моделирование движения нетеплопроводного сжимаемого газа, генерируемого точечным источником / М.Г. Бояршинов, Д.С. Балабанов; правообладатель ГОУВПО ПГТУ. – № 2011613493; дата поступл. 12.05.2011; дата регистр. 29.06.2011.
16. Бояршинов М.Г., Балабанов Д.С. Вычислительное моделирование движения сжимаемой среды, генерируемой точечным источником // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2010. – Т. 3, № 3. – С. 18-32.
17. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. – М.: Наука, 1969. – 512 с.
18. Филиппов И.Г., Горский В.Г., Швецова-Шиловская Т.Н. О рассеянии примеси в приземном слое атмосферы // Теор. основы хим. технол. – 1995. – Т. 29, № 5. – С. 517-521.
19. Методика расчетов выбросов в атмосферу загрязняющих веществ автотранспортом на городских магистралях / А.В. Рузский, В.В. Донченко, В.А. Петрухин и др. – М.: Изд-во Мин-ва транспорта РФ, 1996. – 54 с.

Поступила в редакцию 15.09.11

Сведения об авторах

Бояршинов Михаил Геннадьевич, дтн, проф., Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614990, Пермь, Комсомольский пр., д. 29; E-mail: 9128841776@mail.ru
Балабанов Денис Сергеевич, асп., ПНИПУ; E-mail: denis_balabanov@inbox.ru