

Е.С. Каменецкий

## Влияние числа и положения источников на максимальную концентрацию загрязняющих веществ в уличном каньоне

*Институт прикладной математики и информатики РАН, г. Владикавказ*

Поступила в редакцию 16.03.2007 г.

Численно исследовано влияние положения линейного источника загрязнения, имитирующего поток автотранспорта, на максимальную концентрацию загрязняющих веществ в уличном каньоне. Показано, что наибольшие значения этой концентрации получаются при расположении источника вблизи домов на подветренной стороне улицы. Наименьшие значения максимальной концентрации соответствуют расположению источника в центре улицы или несколько ближе к наветренной стороне. При увеличении числа источников с одного до двух и четырех, при сохранении суммарной интенсивности выбросов, величина максимальной концентрации загрязняющих веществ растет, если источники расположены симметрично относительно центра улицы. Если же источник, наиболее близкий к домам на подветренной стороне улицы, при любом числе источников находится на одинаковом расстоянии от этих домов, то максимальная концентрация загрязняющих веществ с ростом числа источников уменьшается.

В настоящее время основным источником загрязнения атмосферы городов является автотранспорт. При математическом и физическом моделировании распространения загрязняющих веществ, выбрасываемых автотранспортом в уличных каньонах, обычно считают, что с достаточной точностью источник загрязнения можно считать линейным. Один линейный источник, как правило, помещают в центре улицы. Иногда рассматривают несколько линейных источников, симметрично расположенных относительно центра улицы, которые имитируют многорядное движение автотранспорта.

В действительности, даже в режиме скользящего течения, поля скорости воздуха и коэффициента турбулентной диффузии в нижней части каньона существенно неоднородны и концентрация загрязняющих веществ будет заметно меняться при смещении источника загрязнения.

В работе [1] анализировалось влияние положения источника загрязнения на максимальную приземную концентрацию загрязняющего вещества в уличном каньоне, ширина которого равна четырем высотам домов по ее сторонам. В этом случае должен наблюдаться режим изолированной шероховатости, т.е. вблизи домов возникают вихревые течения, а между ними движется воздух, опускающийся в уличный каньон из потока над домами. Показано, что максимальная приземная концентрация наибольшая, когда источник загрязнения находится непосредственно около домов на подветренной стороне улицы, и несколько меньше, когда источник расположен около домов на наветренной стороне. При промежуточных положениях источника  $x/B = 0,25 \div 0,75$  ( $x$  — координата источника, отсчитываемая от дома на подвет-

ренной стороне улицы,  $B$  — ширина улицы) максимальная приземная концентрация примерно в полтора раза меньше. Отметим, что в этой работе источник загрязнения принимался точечным и неподвижным.

В случае однорядного движения максимальная концентрация вблизи дна уличного каньона примерно в полтора раза больше, чем при четырехрядном, если ширина улицы равна высоте домов по ее сторонам при одинаковой суммарной интенсивности выбросов [2].

Представляется целесообразным более подробно исследовать влияние положения одного или нескольких линейных источников загрязнения, имитирующих выброс загрязняющих веществ автотранспортом, на значения максимальной концентрации загрязняющего вещества в уличном каньоне, при различном отношении ширины улицы к высоте домов по ее сторонам.

Так как расстояние между улицами, пересекающими рассматриваемую, обычно значительно больше, чем их ширина, то допустимо решать задачу в двумерном приближении. При решении использовались переменные: вихрь — функция тока ( $\omega - \psi$ ), и грубая модель турбулентности, в которой принималось равенство порождения энергии турбулентности  $K$  скорости ее диссипации в каждой точке, а масштаб турбулентности  $l$  определялся расстоянием от ближайшей точки застройки  $l_{\min}$ . Такая модель завышает величину турбулентной вязкости и диффузии, что в какой-то мере учитывает порождение энергии турбулентности движущимся автотранспортом.

Предполагалось также, что влияние турбулентности на вихрь сводится к его переносу по аналогии с переносом пассивной примеси. Это достаточно грубое допущение, но результаты тестовых расчетов

показывают, что в режиме скользящего течения оно не приводит к существенному искажению картины движения воздуха в уличном каньоне. Концентрация загрязняющего вещества  $C$  определялась путем решения уравнения диффузии. Система уравнений имеет вид [3]:

$$\omega = -\left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2}\right); \quad (1)$$

$$V = -\frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad U = \frac{\partial \psi}{\partial z}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\omega U)}{\partial x} + \frac{\partial(\omega V)}{\partial z} = \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \sqrt{Kl} \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \sqrt{Kl} \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) \right]; \quad (3)$$

$$K = \left\{ l^2 \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + 2 \frac{\partial V}{\partial x} \frac{\partial U}{\partial z} + \left( \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right] \right\} / C_d; \quad (4)$$

$$l = \frac{l_1 C_d^{1/4} \kappa l_{\min}}{C_d^{1/4} \kappa l_{\min} + l_1}; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(UC)}{\partial x} + \frac{\partial(VC)}{\partial z} = \\ & = \frac{1}{Sc} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \sqrt{Kl} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \sqrt{Kl} \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] + Q, \quad (6) \end{aligned}$$

где координата  $x$  направлена поперек улицы,  $z$  — вертикально вверх;  $U$  и  $V$  — соответствующие проекции скорости воздуха;  $Sc$  — число Шмидта;  $\kappa$  — постоянная Кармана;  $C_d$  и  $l_1$  — константы;  $Q$  — интенсивность источников загрязняющих веществ, которая принималась отличной от нуля только в ближайших к дну уличного каньона точках, в которых движутся автомобили. Приподнятость источников над дном уличного каньона в какой-то мере отражает перемешивание воздуха, содержащего загрязняющие вещества, вихрями, возникающими за движущимися автомобилями.

Уравнения записаны в безразмерном виде. В качестве масштаба длины  $l_0$  принималась высота домов по сторонам улицы, а масштаба скорости  $U_0$  — скорость ветра на высоте, равной трем высотам домов. На такой высоте возмущения ветрового потока, вызываемые застройкой, практически не влияют на скорость ветра [4]. Масштаб энергии турбулентности равен квадрату масштаба скорости. Масштаб функции тока  $\psi_0$  выбирался так, чтобы безразмерный коэффициент в выражениях для проекций скорости воздуха был равен единице:  $\psi_0 = U_0 l_0$ . Аналогичным образом определялся масштаб вихря  $\omega_0 = U_0 l_0^2$ . Масштаб интенсивности источника загрязнения связывался с масштабом концентрации загрязняющих веществ так, чтобы безразмерный коэффициент в уравнении диффузии равнялся единице:  $Q_0 = C_0 U_0 / l_0$ .

Поверхность домов и дно уличного каньона принимались непроницаемыми. На них  $\psi = 0$ ,  $\omega = -\partial^2 \psi / \partial n^2$  и  $\partial C / \partial n = 0$ , где  $n$  — нормаль к соответствующей границе. На входной границе, через которую воздух втекает в расчетную область, задавался степенной профиль скорости ветра  $U = U_1 (z/z_1)^n$  с показателем степени, равным 0,33 [5], что соответствует нейтральной стратификации при толщине слоя шероховатости, равной нескольким метрам. Чаще используются меньшие значения показателя степени: 0,299 [6] или даже 0,25 [7], но в режиме скользящего течения, который будет рассматриваться в дальнейшем, картина течения воздуха в уличном каньоне почти не зависит от показателя степени при его изменении в диапазоне 0,25–0,33. Вертикальная составляющая скорости ветра  $V$  на этой границе принималась равной нулю.

По известной величине скорости ветра рассчитывалось значение функции тока на входной границе, а завихренность определялась из выражения  $\omega = -\partial U / \partial z$ . Верхняя граница принималась непроницаемой, т.е. на ней функция тока постоянна, а завихренность определялась из выражения  $\omega = -\partial^2 \psi / \partial z^2$ . Концентрация загрязняющего вещества на этой границе так же, как и на входной, принималась равной нулю:  $C = 0$ . Расстояние от входной границы до подветренной стороны уличного каньона было не менее 0,75  $B$ . Верхняя граница находилась на высоте, равной трем высотам домов  $H$ , находящихся по сторонам уличного каньона. Расчеты, проведенные при высоте верхней границы, равной четырем высотам домов, показали совершенно такую же картину течения воздуха в каньоне, как и при положении верхней границы на высоте, равной трем высотам домов. На выходной границе, через которую воздух вытекает из расчетной области, производные от искомых величин по нормали к границе принимались равными нулю:  $\partial \psi / \partial x = 0$ ,  $\partial \omega / \partial x = 0$ ,  $\partial C / \partial x = 0$ . Расстояние от наветренной стороны улицы до выходной границы принималось не менее удвоенной ширины уличного каньона. Высота домов по сторонам улицы считалась одинаковой.

Уравнения переноса вихря и диффузии решались методом установления с помощью конечно-разностной схемы «классики» [8]. Для уменьшения схемной диффузии в членах, описывающих конвективный перенос вихря и концентрации, производные аппроксимировались конечными разностями первого порядка в направлении против потока. Для того чтобы решение было более гладким, результаты, полученные при двух последовательных итерациях, осреднялись.

Уравнение Пуассона, из которого определялась функция тока, решалось методом последовательной верхней релаксации [8]. Расчеты проводились на совмещенной равномерной сетке, в которой был 61 узел по вертикали и 151 узел по горизонтали. Высота домов соответствовала 20 шагам сетки. Пространственные шаги при этом были равны 0,05.

Контрольный расчет, проведенный с сеткой, имеющей 91 узел по вертикали (при этом высота домов соответствовала 30 шагам сетки и простран-

ственные шаги были равны  $1/30$ ), показал, что максимальная горизонтальная скорость воздуха над проезжей частью отличается от рассчитанной с шагами, равными  $0,05$ , менее чем на  $1\%$ , максимальная скорость подъема воздуха вдоль стен домов, находящихся на подветренной стороне, увеличилась примерно на  $2\%$ , а максимальная скорость опускания воздуха вдоль стен домов на наветренной стороне увеличилась приблизительно на  $8\%$  из-за небольшого смещения центра вихря к наветренной стороне улицы. При большем разрешении появились также маленькие вторичные вихри у подошв домов на наветренной и подветренной сторонах улицы. Все эти изменения не приводят к существенному изменению поля концентрации загрязняющих веществ внутри каньона.

Поскольку поле концентрации загрязняющего вещества зависит в основном от движения воздуха, для тестирования модели сравним расчетные значения вертикальной составляющей скорости воздуха вблизи наветренной и подветренной сторон уличного каньона, отнесенные к горизонтальной скорости ветра на уровне крыш в центре каньона, с результатами экспериментов [9]. Такое сравнение при ширине улицы  $B$ , равной высоте домов  $H$ , приведено на рис. 1.

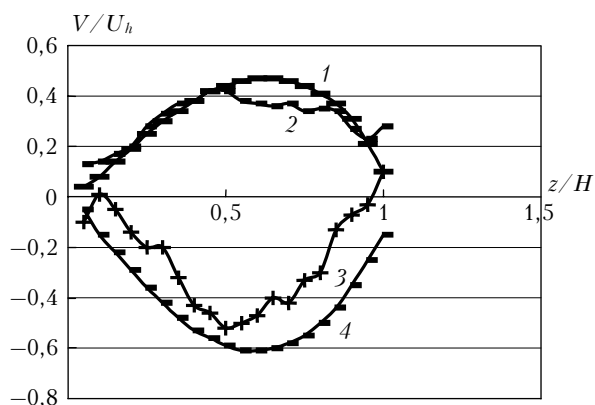


Рис. 1. Вертикальная скорость воздуха при  $x/B = 0,15$  (1 — расчет, 2 — эксперимент) и  $0,85$  (3 — расчет, 4 — эксперимент)

Видно, что скорость подъема воздуха вблизи подветренной стороны каньона описывается в модели достаточно хорошо, а скорость опускания воздуха с наветренной стороны в расчетах несколько завышается.

Максимальная концентрация загрязняющего вещества в уличном каньоне при разных положениях источника загрязнения, нормированная на значение этой концентрации в случае, когда ширина улицы равна высоте домов по ее сторонам (кривая 1), а линейный источник находится в центре улицы, приведена на рис. 2.

Кривая 2 соответствует ширине улицы, вдвое большей, чем высота домов. Видно, что наибольшие значения максимальной концентрации загрязняющего вещества наблюдаются в случае, когда источник загрязнения, т.е. движущийся автотранспорт, находится вблизи домов на подветренной стороне улицы.

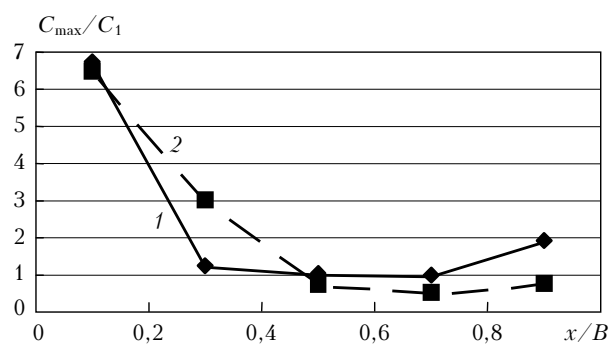


Рис. 2. Изменение максимальной концентрации загрязняющего вещества в уличном каньоне в зависимости от положения источника загрязнения для узких (1) и широких (2) улиц

Если источник загрязнения близок к домам на наветренной стороне улицы, максимальная концентрация несколько больше, чем при его расположении в центре улицы. В более широких уличных каньонах при смещении источника от домов на подветренной стороне к центру улицы максимальная концентрация падает медленнее, что связано с наличием вторичного вихря в нижней части домов на подветренной стороне. Таким образом, максимальная концентрация загрязняющего вещества в уличном каньоне, как правило, наблюдается там, где находится источник загрязнения. Только в случае, когда источник в узкой улице находится вблизи домов на ее подветренной стороне, максимальная концентрация загрязняющего вещества по результатам расчетов получается у подошвы этих домов.

Отметим, что в расчетах изменение положения линейного источника загрязняющего вещества значительно сильнее влияет на концентрацию этого вещества вблизи домов на подветренной стороне улицы, чем в экспериментах, проведенных в аэродинамической трубе при ширине улицы, равной высоте домов по ее сторонам [10]. По-видимому, это связано с завышением в используемой модели коэффициента турбулентной диффузии.

Поскольку чаще всего движение автомобилей по улицам происходит в несколько рядов, целесообразно рассмотреть изменение максимальной концентрации загрязняющего вещества в зависимости от числа и положения линейных источников. На рис. 3 показано изменение этой концентрации для двух линейных источников, расстояние между которыми во всех случаях равно  $0,4$  ширины улицы, при изменении положения источника, более близкого к подветренной стороне улицы.

Предполагалось, что суммарная интенсивность двух источников загрязнения равна интенсивности одного источника в ранее описанных случаях, т.е. интенсивность каждого из источников вдвое меньше. Для двух источников максимальная концентрация при сделанных предположениях почти вдвое меньше, чем для одного, если ширина улицы вдвое больше высоты домов. Поле концентрации загрязняющего вещества вблизи каждого источника в этом случае мало зависит от наличия второго источника загрязнения.

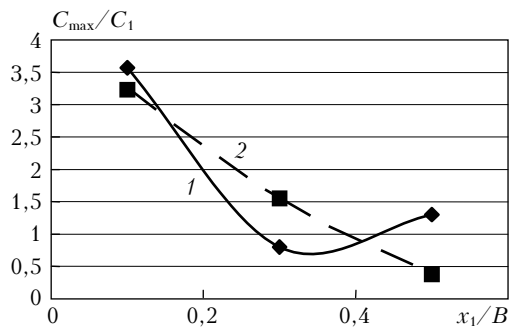


Рис. 3. Изменение максимальной концентрации загрязняющего вещества в уличном каньоне в зависимости от положения источника загрязнения, более близкого к подветренной стороне улицы для двух источников в узких (кривая 1) и широких (кривая 2) улицах

Если ширина улицы равна высоте домов, то абсолютное расстояние между источниками вдвое меньше, и хотя максимальная концентрация загрязняющего вещества для двух источников и в этом случае меньше, чем для одного, ее уменьшение не столь велико. Только если один из источников загрязнения очень близок к подветренной стороне улицы, то максимальная концентрация загрязняющего вещества для двух источников почти в два раза меньше, чем для одного.

При увеличении числа источников от одного до четырех, в случае их симметричного расположения относительно центра улицы, максимальная концентрация загрязняющего вещества увеличивается (кривая 1, рис. 4), что связано с приближением одного из источников к домам на подветренной стороне улицы.

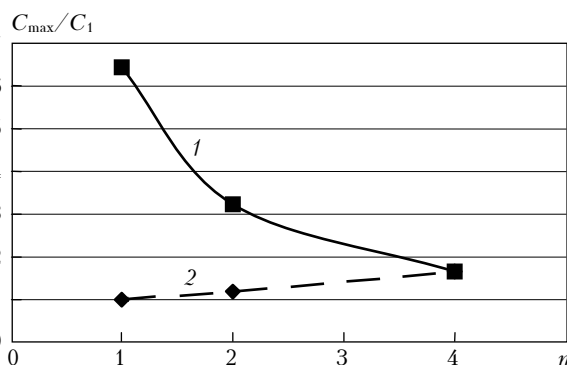


Рис. 4. Зависимость максимальной концентрации загрязняющего вещества в уличном каньоне от числа линейных источников при их разном расположении

При этом если источник один — он расположен в центре улицы, если их два, то  $x_1/B = 0,3$ ;  $x_2/B = 0,7$ ; а для четырех источников:  $x_1/B = 0,1$ ;  $x_2/B = 0,35$ ;  $x_3/B = 0,65$  и  $x_4/B = 0,9$ . Суммарный выброс из всех

источников предполагается одинаковым, т.е. каждый из двух источников выбрасывает загрязняющих веществ вдвое меньше, чем одиночный источник, а каждый из четырех — соответственно в 4 раза меньше. В случае, когда ближайшие к подветренной стороне улицы источники загрязнения находятся на одном и том же расстоянии от этих домов, а расстояние между источниками, если их несколько, такое же, как при их симметричном расположении относительно центра улицы (для одного источника  $x/B = 0,1$ ; для двух источников  $x_1/B = 0,1$ ;  $x_2/B = 0,5$ ; а четыре расположены так же, как и в предыдущем случае), то максимальная концентрация загрязняющего вещества с увеличением числа источников уменьшается (кривая 2, рис. 4). Отметим, что максимальная концентрация загрязняющего вещества во всех случаях нормировалась на ее значение для одного линейного источника, расположенного в центре улицы.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что при наличии преимущественного направления ветра, что часто наблюдается, если город расположен в горах или предгорьях, для понижения максимальной концентрации загрязняющего вещества в уличном каньоне целесообразно располагать проезжую часть несколько ближе к домам, находящимся на наветренной стороне улиц.

1. Chan A.T., So E.S.P., Samad S.C. Strategic guidelines for street canyon geometry to achieve sustainable air quality // Atmos. Environ. 2001. V. 35. P. 5681–5691.
2. Lanzani G., Tamponi M. A microscale lagrangian particle model for the dispersion of primary pollutants in a street canyon. Sensitivity analysis and first validation trials // Atmos. Environ. 1995. V. 29. N 23. P. 661–674.
3. Каменецкий Е.С. Вторичный вихрь и его влияние на распространение загрязняющих веществ в уличном каньоне // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2004. Прилож. № 10. С. 28–32.
4. Pemper Э.И. Архитектурно-строительная аэродинамика. М.: Стройиздат, 1984. 294 с.
5. Moriguchi G., Uchara K. Numerical and experimental simulations complex urban roadways and their surroundings // J. Wind Eng. 1992. N 52. P. 102–107.
6. Pavitskiy N.J., Yakushin A.A., Zhubrin S.V. Computer simulating of wind-driven exhaust dispersion in the street canyons // J. Wind Eng. 1992. N 52. P. 120–125.
7. Kim J.-J., Baik J.-J. Urban street-canyon flows with bottom heating // Atmos. Environ. 2001. V. 35. P. 3395–3404.
8. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. 616 с.
9. Baik J.-J., Kim J.-J. On the escape of pollutants from urban street canyons // Atmos. Environ. 2002. V. 36. P. 527–536.
10. Kastner-Klein P., Plate E.J. Wind tunnel study of concentration fields in street canyons // Atmos. Environ. 1999. V. 33. P. 3973–3979.

**E.S. Kamenetsky. Influence of the number and positions of sources on the maximum pollutant concentration at the street canyon.**

Effects of linear sources positions and the number on the maximum pollutant concentration are numerically investigated. It is found that the lowest value of maximum concentration is produced when the sources are placed near the center of the street or nearer to the windward side. When the number of sources increases, the maximum pollutant concentration becomes lower, if the sources are placed symmetrically at the street canyon, and grows, if the source the nearest to the leeward side of the street, is at the same place.