

В.А. Шлычков<sup>1</sup>, А.И. Бородулин<sup>2</sup>, Б.М. Десятков<sup>2</sup>

## Численное моделирование циркуляции воздуха и переноса примеси в городских условиях с явным учетом ландшафта

<sup>1</sup> Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Новосибирск

<sup>2</sup> ФГУН ГНЦ ВБ «Вектор», пос. Кольцово Новосибирской обл.

Поступила в редакцию 27.11.2005 г.

Структура воздушных потоков в городском ландшафте имеет сложный характер и сильно зависит от метеорологических условий, рельефа местности, расположения зданий и сооружений, их этажности. Наиболее экологически опасные ситуации реализуются при устойчивой стратификации и слабом ветре. С целью детализации циркуляции воздуха на небольших площадках с разрешением отдельных зданий и сооружений сформулирована гидродинамическая модель течений с характеристиками потоков, усредненными по высоте приземного слоя атмосферы. Приведен пример расчетов распространения атмосферных примесей для одного из микрорайонов пос. Кольцово Новосибирской области.

Определение полей концентрации атмосферных примесей над большими городами с использованием моделей, разрешающих отдельные здания и сооружения, достаточно громоздко в реализации и требует привлечения значительных ресурсов времени для расчетов. С другой стороны, часто требуется только детализовать поля концентрации атмосферных примесей над какой-либо частью рассматриваемой области, например каким-либо микрорайоном города. В этом случае целесообразно на первом этапе использовать достаточно грубые, упрощенные модели для определения полей концентрации атмосферных примесей в пределах всего города, а на втором этапе с использованием полученных данных в качестве начальных и граничных условий провести расчеты с детализацией полей концентрации при непосредственном учете отдельных зданий и сооружений. В статье рассматривается пример решения задачи такого рода.

К территории пос. Кольцово Новосибирской области прилегает птицеводческий завод. Расстояние от птицеводческого завода до ближайшего микрорайона пос. Кольцово составляет менее 2 км. При ветре, дующем в направлении от птицеводческого завода в сторону пос. Кольцово, на территории последнего может наблюдаться характерный запах от производства, который доставляет дискомфорт его жителям. На рис. 1, а приведен фрагмент топографической карты региона, где выделены территория птицеводческого завода и ближайший к нему микрорайон пос. Кольцово.

На первом этапе расчетов с помощью модели распространения атмосферных примесей, использующей численно-аналитический метод определения полей скорости ветра, температуры и влажности воздуха [1], для территории, включающей пос. Кольцово, решалась задача распространения невесомой примеси с птицеводческого завода. В этих расчетах наличие зданий и сооружений учитывалось интегрально, путем задания параметров шероховатости подстилающей поверх-

ности. На поверхности земли задавался плоскостной источник с равномерно распределенным по территории птицеводческого завода вертикальным потоком примесей. Моделировались типичные для июньской ночи метеорологические условия: устойчивая стратификация; слабый ветер, направленный со стороны птицеводческого завода на пос. Кольцово. Задача решалась на сетке 40×40 узлов на площадке 4×4 км. Пример проведенных расчетов дан на рис. 1, б, где стрелками показаны векторное поле скорости ветра и изолинии концентрации атмосферной примеси в сечении на высоте 2 м от подстилающей поверхности.

Рассмотрим постановку второго этапа решения задачи. Ветровой режим над пересеченной местностью формируется за счет внешнего потока, турбулентного перемешивания и рельефа местности, а также в значительной степени определяется температурной стратификацией воздушных масс. При неустойчивой стратификации, например вследствие сильного нагрева подстилающей поверхности в летнее время, в атмосфере развиваются мощные вертикальные токи, обуславливающие перенос приземной субстанции в верхние слои [2].

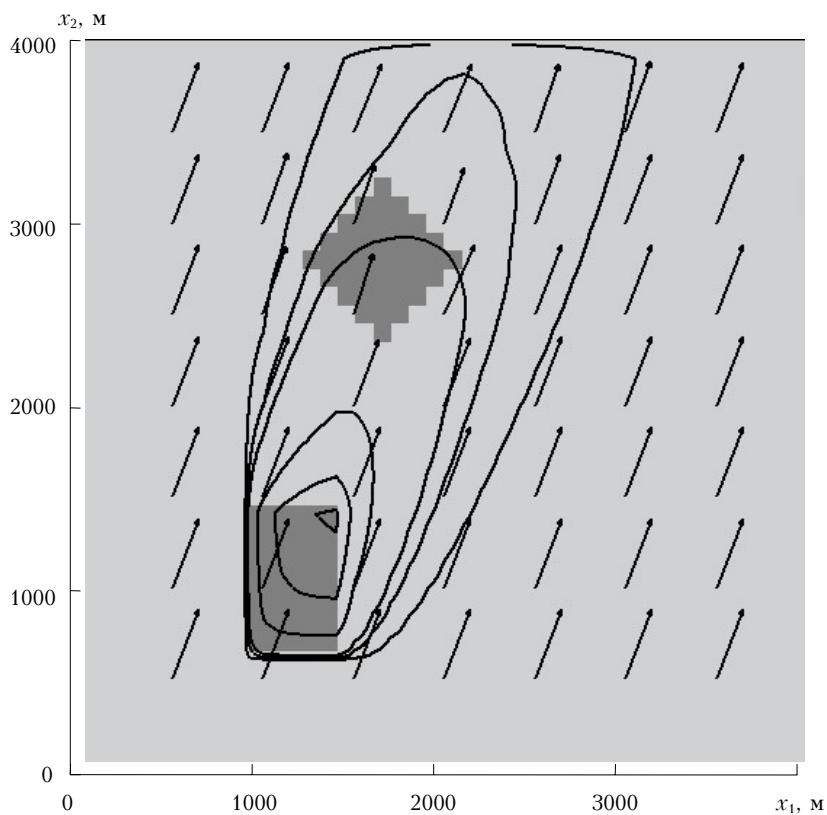
При движении воздушной приземной массы в условиях устойчивой стратификации формируются два слоя с различными свойствами. Нижний слой, непосредственно прилегающий к подстилающей поверхности, сильно турбулизован из-за влияния неоднородностей, связанных с шероховатостью поверхности, и градиентом скорости ветра по вертикали. Это так называемый квазистационарный приземный подслой, в котором вертикальные турбулентные потоки считаются постоянными по высоте. Толщина приземного слоя зависит от типа подстилающей поверхности, силы ветра и при устойчивой стратификации достигает нескольких десятков метров. Именно в пределах этого слоя, как правило, происходит распространение примеси от приземных источников.



Территория птицевозода

Микрорайон пос. Кольцово

*a*



*б*

Рис. 1. Фрагмент топографической карты региона (*a*), пример расчетов поля скорости ветра и концентрации примесей для сечения на высоте 2 м от подстилающей поверхности (*б*)

Выше него расположен слабо турбулизированный атмосферный пограничный слой, формируемый суточным ходом температуры на подстилающей поверхности. Вертикальные градиенты полей скорости в атмосферном пограничном слое невелики по сравнению с приземным слоем. Слой, обусловленный суточным изменением метеорологических условий, отделен от вышерасположенной свободной атмосферы инверсионным подслоем. Следовательно, обтекание неоднородностей рельефа при устойчивой стратификации, по сути, соответствует случаю движения тяжелой жидкости, расположенной под более легкой.

Введем декартову прямоугольную систему координат  $x_i$ ,  $i = \overline{1,3}$ , в которой ось  $x_3$  направлена вертикально, а оси  $x_1$  и  $x_2$  горизонтально вдоль границ рассматриваемого микрорайона пос. Кольцово (рис. 1, а). Определим область решения в виде параллелепипеда с нижней границей, совпадающей с подстилающей поверхностью:

$$0 \leq x_1 \leq L_1; \quad 0 \leq x_2 \leq L_2; \quad \delta \leq x_3 \leq h,$$

где  $L_j$  ( $j = \overline{1,2}$ ) – размеры области по горизонтали; функция  $\delta(x_1, x_2)$  задает рельеф местности;  $h$  – координата верхней границы рассматриваемой области. Если в качестве исходных рассмотреть уравнения гидродинамики несжимаемой жидкости [3], то при характерных горизонтальных масштабах процессов можно считать, что  $L_1 \approx L_2$  много больше  $h$ . Это предположение позволяет принять гипотезу квазистагики и упростить уравнения гидротермодинамики путем их усреднения по вертикали [4]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial h U_1}{\partial t} + \frac{\partial h U_1^2}{\partial x_1} + \frac{\partial h U_1 U_2}{\partial x_2} = \\ & = -\lambda \Delta T h \frac{\partial(h+\delta)}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_1} h K \frac{\partial U_1}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_2} h K \frac{\partial U_1}{\partial x_2} - c_d |U| U_1; \\ & \frac{\partial h U_2}{\partial t} + \frac{\partial h U_1 U_2}{\partial x_1} + \frac{\partial h U_2^2}{\partial x_2} = \\ & = -\lambda \Delta T h \frac{\partial(h+\delta)}{\partial x_2} + \frac{\partial}{\partial x_1} h K \frac{\partial U_2}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_2} h K \frac{\partial U_2}{\partial x_2} - c_d |U| U_2; \\ & \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_1}{\partial x_1} + \frac{\partial h U_2}{\partial x_2} = 0, \end{aligned}$$

где  $U_j$  ( $j = \overline{1,2}$ ) – математические ожидания компонент горизонтальной скорости ветра, усредненные в слое  $\delta \leq x_3 \leq h$ ;  $K$  – коэффициент турбулентного обмена;  $\Delta T > 0$  – вертикальный перепад температур между устойчивым приземным слоем и вышележащей атмосферой;  $\lambda$  – параметр плавучести;  $|U| = \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$ ;  $c_d$  – коэффициент сопротивления. Таким образом, задача расчета пространственно-временного распределения метеорологических полей сведена к решению выписанной выше системы уравнений для определения  $U_j$ ,  $h$ .

Краевые условия на боковых границах сформируем в виде

$$U_1 = U_{01}; \quad U_2 = U_{02}; \quad h = h_0 \quad \text{при } (x_1, x_2) \in \Gamma^+;$$

$$\frac{\partial U_1}{\partial x_1} = \frac{\partial U_1}{\partial x_2} = \frac{\partial U_2}{\partial x_1} = \frac{\partial U_2}{\partial x_2} = 0 \quad \text{при } (x_1, x_2) \in \Gamma^-,$$

где  $\Gamma^+$  – граничные участки втекания потока в область;  $\Gamma^-$  – участки, где поток вытекает из области. В качестве начальных условий зададим  $U_j = U_{0j}$ ,  $h = h_0$ .

Турбулентное замыкание проведем на основе двумерной модели [5]:

$$K = \alpha_s \Delta x_1 \Delta x_2 \sqrt{D_T^2 + D_S^2},$$

где

$$D_T = \frac{\partial U_1}{\partial x_1} - \frac{\partial U_2}{\partial x_2}; \quad D_S = \frac{\partial U_2}{\partial x_1} + \frac{\partial U_1}{\partial x_2};$$

$\alpha_s \approx 1$  – константа;  $\Delta x_1$ ,  $\Delta x_2$  – размеры шаблона разностной сетки.

«Плоская» модель эволюции поля концентрации  $C(x_1, x_2, t)$  также может быть получена усреднением уравнения переноса и диффузии невесомой пассивной примеси по вертикальной координате [6]:

$$\frac{\partial h C}{\partial t} + \frac{\partial h U_1 C}{\partial x_1} + \frac{\partial h U_2 C}{\partial x_2} = \alpha_c \left( \frac{\partial}{\partial x_1} h K \frac{\partial C}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_2} h K \frac{\partial C}{\partial x_2} \right),$$

где  $C$  – математическое ожидание концентрации примеси, усредненное в слое  $\delta \leq x_3 \leq h$ . Краевые условия задаются в виде

$$C = C_0 \quad \text{при } (x_1, x_2) \in \Gamma^+;$$

$$\frac{\partial C}{\partial x_1} = \frac{\partial C}{\partial x_2} = 0 \quad \text{при } (x_1, x_2) \in \Gamma^-.$$

Методы решения выписанных уравнений основаны на конечно-разностной аппроксимации исходных систем на расчетном шаблоне. Использована прямоугольная сетка с узлами, разнесенными по граням элементарной пространственной ячейки. Сетки такого рода позволяют строить консервативные разностные схемы, а применяемые неявные методы обеспечивают устойчивость метода при численном интегрировании. Пространственная аппроксимация дифференциальных операторов основана на современных представлениях о монотонных схемах и схемах с невозрастанием полной вариации – TVD-технологии. Это, в частности, гарантирует неотрицательность заведомо положительных величин. В численных алгоритмах использован класс неявных схем высокого порядка аппроксимации, предложенный в [7].

Обратимся к результатам расчетов. Рассматриваемый микрорайон пос. Кольцово представлен жилыми многоэтажными зданиями и объектами городской инфраструктуры низкой этажности. На рис. 2, построенном на топографической основе фрагмента

ГИС г. Новосибирска, здания отражены черными прямоугольниками, а серым цветом обозначены дороги. Расчетная область площадью 700×650 м включала 140×130 сеточных узлов, шаг сетки в обоих направлениях  $x_1$ ,  $x_2$  равнялся 5 м. Вариация высот топографии подстилающей поверхности не превышала 10 м. Рельеф местности и расположение зданий учитывались посредством задания функции  $\delta(x_1, x_2)$ .

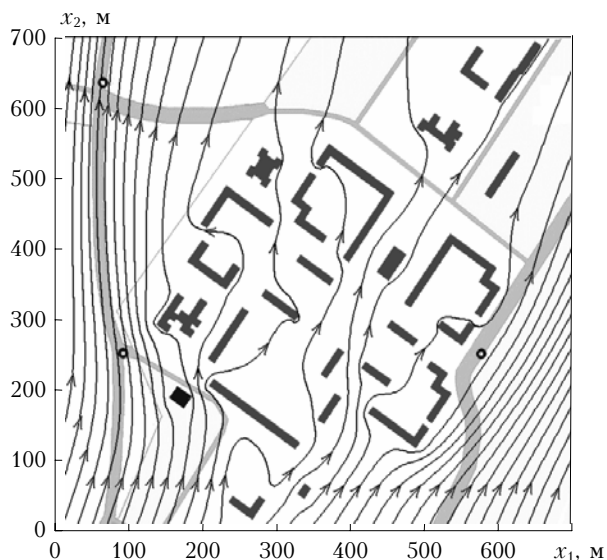


Рис. 2. Изолинии функции тока при обтекании микрорайона пос. Кольцово для условий сильно устойчивой стратификации

На втором этапе расчетов производилась детализация полей, полученных на грубой сетке, за счет сгущения узлов и прямого описания объектов застройки и ландшафта при использовании выписанной выше системы уравнений для территории микрорайона. На боковых границах микрорайона, где субстанции втекают в расчетную область, значения скорости и концентрации задавались по результатам расчетов, проведенных на грубой сетке.

На рассматриваемых масштабах влияние эффектов нестационарности невелико, релаксация процессов происходит достаточно быстро (за период менее 1 ч). В связи с этим в данном случае можно ограничиться рассмотрением установившегося течения. Уравнение неразрывности в выписанной выше системе уравнений позволяет ввести в рассмотрение функцию тока  $\psi$ , исходя из соотношений [8]:

$$hU_1 = \frac{\partial \psi}{\partial x_2}; \quad hU_2 = -\frac{\partial \psi}{\partial x_1}.$$

Совокупность приведенных на рис. 2 кривых показывает пространственное распределение функции тока, полученное для случая сильной инверсии приземного слоя при  $\Delta T = 10$  °C и слабом ветре (стрелки на кривых показывают направление движения частиц по траекториям). Механизмы переваливания потока через вершины зданий в этих условиях блокированы, и практически реализуется только боковое обтекание, аналогичное процессу глад-

кого обтекания препятствий потоком тяжелой жидкости. Эффекты обтекания на рис. 2 выражаются в том, что линии тока не пересекают контуров зданий. Заметим, что на ровной поверхности траектории представляли бы собой прямые линии, направленные по вектору внешней скорости.

Полученные результаты показывают, что на боковых (относительно потока) границах микрорайона имеет место сгущение линий тока, что говорит об усилении скорости ветра в этих областях. На фронтальной стороне и внутри кварталов, напротив, наблюдается расхождение кривых с формированием нерегулярной структуры линий тока, геометрия которых обусловлена влиянием отдельных строений. Это свидетельствует о торможении потока с наветренной стороны и на внутренних территориях и образовании ветровой тени за препятствиями. Ветровая тень формируется и с подветренной стороны как результат суммарного воздействия городской агломерации на внешний поток.

Замедление течения перед препятствиями приводит к увеличению толщины движущего слоя  $h$  и образованию зоны подпора воздушного потока. При значениях  $h$ , превышающих высоту зданий, развиваются процессы перетекания воздуха через вершины препятствий. Непосредственно над крышами домов скорость течения скачком возрастает и может в несколько раз превышать скорость набегающего потока, а с тыльной стороны зданий быстро падает. Комбинированный тип движения с боковым огибанием и переваливанием наблюдается при увеличении силы внешнего ветра и ослаблении инверсии. Реализация того или иного механизма взаимодействия течения с препятствиями зависит от локальных и внешних динамических параметров, индивидуальных характеристик здания, его положения на местности и т.п.

Особенности внутренней динамики течения определяют и закономерности перераспределения примеси по территории микрорайона. На рис. 3 представлено рассчитанное поле концентрации, нормированное на максимальное значение, доставляемое внешним потоком. Расчеты проведены при скорости набегающего потока 4 м/с и перепаде температуры 4 °C в устойчивом слое с начальной толщиной  $h_0 = 20$  м.

Рис. 3 показывает, что фронтон здания на юго-западной границе микрорайона образует своеобразный экран, препятствующий переносу примеси во внутреннюю область. Вследствие сравнительно большой высоты этого здания, примерно 30 м, в локальном течении доминируют процессы бокового обтекания, перенаправляя поток в стороны по периферии микрорайона; при этом с тыльной стороны дома наблюдается незначительная концентрация примеси. Здания на юго-восточной окраине не так высоки, примерно 15 м, и в результате ускорения потока при переваливании в их окрестности аккумулируются значительные концентрации, в 2,5 раза превышающие максимальный фоновый уровень (см. зачерненные области на рис. 3). Уменьшение концентрации за низкими препятствиями незначительно, что заметно

по слабому просвету в их подветренных следах на рис. 3. Под влиянием динамического напора отдельные струи примеси распространяются внутрь микрорайона через межкорпусные промежутки, однако их вклад в общее загрязнение невелик.

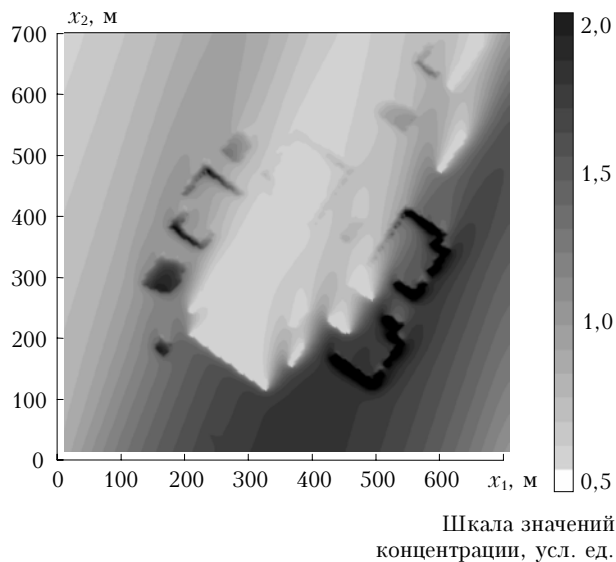


Рис. 3. Рассчитанное поле концентрации, нормированное на максимальное значение, доставляемое внешним потоком

В целом, за счет воздействия застройки суммарная масса примеси над микрорайоном уменьшается на 40% по отношению к варианту переноса невозмущенным потоком над ровной местностью. Таким образом, в данных метеорологических условиях микрорайон исполняет роль средства экологической самозащиты за счет отвода основного загрязняющего потока на периферию микрорайона. Следует, однако, отметить, что в непосредственной близости от поверхностей зданий, «встречающих» набегающий поток, существуют застойные зоны. В них происходит дополнительное накопление атмосферных примесей.

*V.A. Shlychkov, A.I. Borodulin, B.M. Desyatkov. Numerical simulation of air circulation and pollutant transfer under city conditions with explicit evaluation of the landscape.*

The structure of airflows in the city landscape has a complex character and strongly depends on meteorological conditions, the locality relief, the location of buildings and constructions, and the number of storeys in them. The most ecologically dangerous situations are realized at stable stratification and weak wind. The hydrodynamic model of flows with the characteristics averaged over the height of the near-ground atmospheric layer was formulated for detailing of air circulation on small areas with the resolution of individual buildings and constructions. An example of calculations of atmospheric pollutant spread is presented for one of the micro-districts of Koltsovo, Novosibirsk region.

Таким образом, городская застройка играет существенную роль в формировании поля загрязнений при слабом ветре и инверсионной стратификации, т.е. в условиях, наиболее неблагоприятных с точки зрения обеспечения качества воздуха. Расчеты показывают, что город как макроструктура ландшафта обуславливает деформацию внешнего потока и препятствует переносу атмосферных загрязнителей во внутренние области. Вместе с тем градостроительные комплексы перераспределяют набегающий поток и ослабляют локальные внутренние циркуляции, что затрудняет эффективное проветривание территории. Антропогенные загрязнители, генерируемые в пределах городской черты, могут в этих случаях серьезно осложнить экологическую обстановку в мегаполисе.

Авторы выражают благодарность Международному научно-техническому центру (МНТЦ) за финансовую поддержку работы в рамках проекта МНТЦ #2991.

1. Десятков Б.М. Об одном методе параметризации приземного слоя атмосферы // Тр. Зап.-Сиб. регион. научно-исслед. ин-та. Новосибирск, 1986. Вып. 77. С. 68–73.
2. Шлычков В.А. Численная модель пограничного слоя атмосферы с детализацией конвективных процессов на основе вихререзающего подхода // Аэрозоли Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. С. 271–297.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 733 с.
4. Гутман Л.Н. Введение в нелинейную теорию мезометеорологических процессов. Л.: Гидрометеонздат, 1969. 295 с.
5. Smagorinsky J., Manabe S., Holloway J. Numerical Results from a Ninelevel General Circulation Model of the Atmosphere // Mon. Weather Rev. 1965 V. 93. N 8. P. 727–768.
6. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей. Л.: Гидрометеонздат, 1985. 351 с.
7. Harten A. On a Class of High Resolution Total-variation-stable Finite-difference Schemes // SIAM J. of Numer. Anal. 1984. V. 21. N 1. P. 1–23.
8. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973. 848 с.