

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОГРАНИЧЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ И ИХ АДАПТАЦИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МИКРОКЛИМАТА г. УСТЬ-КАМЕНОГОРСКА

Н. М. ТЕМИРБЕКОВ

Восточно-Казахстанский государственный технический университет

им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

М. Н. МАДИЯРОВ, Ф. Н. АБДОЛДИНА, Е. А. МАЛГАЖДАРОВ

Восточно-Казахстанский государственный университет

им. С. Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан

e-mail: nurlan@vkgu.kz, farida_mail@mail.ru

In the given work a numerical model of the microclimate in the city located in a mountainous district is considered. The model uses spatial non-hydrostatic numerical models of local atmospheric processes and an equation for the harmful pollutants transfer in the atmospheric air. On the basis of the considered model of microclimate, a computational technology is implemented and specifically adopted for the conditions of Ust-Kamenogorsk. Using this technology numerical experiments have been carried out.

На формирование микроклимата города влияют такие факторы, как городские застройки, воздействие которых на внешний ветер проявляется через увеличение шероховатости подстилающей поверхности; различия в теплофизических свойствах подстилающей поверхности в городе и окрестностях; искусственные потоки тепла антропогенного происхождения; загрязнение воздуха; разность альбедо в городе и его окрестностях; уменьшение затрат тепла на испарение из-за отсутствия растительности и потока влаги в почву и др. Вклад этих факторов в разные сезоны года в различных городах в течение дня меняется. Они в основном определяют микроклимат городов, расположенных на ровной поверхности. При формировании микроклимата города, находящегося в горной местности, получается несколько иная картина локальных атмосферных движений. В этом случае в число действующих механизмов включаются склоновые эффекты, вклад которых соизмерим с влиянием “острова тепла”, а в некоторых ситуациях может и превосходить его.

Основу рассматриваемой нами численной модели для города Усть-Каменогорска составляют пространственные негидростатические численные модели локальных атмосферных процессов [1, 2]. При этом в первую очередь учитываются гидродинамические аспекты

проблемы — взаимодействие воздушной массы с подстилающей поверхностью, формирование островов тепла и локальных циркуляций на фоне внешнего потока. На развитие атмосферных процессов в промышленном городе кроме природных факторов влияет широкий спектр возмущений антропогенного происхождения. Чтобы учесть их суммарный эффект, в численной модели заложена возможность изменения ее структуры в зависимости от характерных пространственно-временных масштабов антропогенных источников и исследуемых явлений.

Рассмотрим негидростатическую модель локальных атмосферных движений в декартовой системе координат:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)u = -\frac{\partial \pi}{\partial x} + lv + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_u \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \Delta u; \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)v = -\frac{\partial \pi}{\partial y} - lu + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_u \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \Delta v; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)\omega = -\frac{\partial \pi}{\partial z} + \lambda\theta + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_\omega \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) + \Delta \omega; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)\theta + S\omega = -u(s\delta_x + \theta_x) - v(s\delta_y + \theta_y) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_\theta \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \Delta \theta; \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

Здесь $\Delta = \frac{\partial}{\partial x} \mu_1 \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu_2 \frac{\partial}{\partial y}$; $(\mathbf{u} \cdot \nabla)u = (u, v, \omega) \left(\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z} \right) = u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \omega \frac{\partial u}{\partial z}$; \mathbf{u} — вектор скорости ветра; λ, S — параметры конвекции и стратификации; μ_1, μ_2 — горизонтальные коэффициенты турбулентности; ν_u, ν_θ — вертикальные коэффициенты турбулентности для количества движения и тепла; $u', v', \omega', \theta', \pi'$ — отклонения от соответствующих фоновых значений компонент вектора скорости ветра, потенциальной температуры, функции, зависящей от давления, соответственно; θ_x, θ_y — горизонтальные градиенты фоновой потенциальной температуры; l — параметр Кориолиса; $z = z_1 - \delta(x, y)$, z_1 — высота над уровнем моря, уравнение $z_1 = \delta(x, y)$ описывает рельеф.

Система (1)–(5) для города решается при следующих граничных условиях:

$$u = f_1(y, z, t), \quad v = f_2(y, z, t), \quad \omega = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \quad \text{при } x = 0, \quad 0 \leq y \leq Y,$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial u}{\partial x}, \quad \omega = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \quad \text{при } x = X, \quad 0 \leq y \leq Y,$$

$$u = f_1(x, z, t), \quad v = f_2(x, z, t), \quad \omega = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0 \quad \text{при } y = 0, \quad 0 \leq x \leq X, \quad (6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\partial v}{\partial y}, \quad \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = 0, \quad \omega = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0 \quad \text{при } y = Y, \quad 0 \leq x \leq X,$$

$$u = 0, \quad v = 0, \quad \theta = 0, \quad \omega = 0, \quad \pi = 0 \quad \text{при } z = H,$$

$$\omega = 0, \quad h \frac{\partial u}{\partial z} = a_u u, \quad h \frac{\partial v}{\partial z} = a_v v, \quad h \frac{\partial \theta}{\partial z} = a_\theta (\theta - \theta_0) \quad \text{при } z = h,$$

где $a_u = \frac{\varphi_u(\xi_h)}{f_u(\xi_h, \xi_0)}$, $a_\theta = \frac{\varphi_\theta(\xi_h)}{f_\theta(\xi_h, \xi_0)}$; h — высота приземного слоя; H — условная высота пограничного слоя атмосферы; $\xi = \frac{z}{H}$ — безразмерная высота, $\xi_h = \frac{h}{H}$, $\xi_0 = \frac{\xi_h}{H\bar{z}}$, $\bar{z} = \frac{z_u}{z_0}$; X, Y — боковые границы области. Граничные условия $u = f_1(y, z, t)$, $v = f_2(y, z, t)$ и условия в приземном слое атмосферы моделируют физический смысл происходящих процессов. А остальные граничные условия требуют гладкости возмущений и выполнения уравнения неразрывности в окрестности границы интегрируемой области.

Основой для физического описания приземного слоя атмосферы выбраны теория подобия Мони́на — Обухова [4] и эмпирические функции из работы [3].

Систему уравнений (1)–(6) будем решать методом расщепления по физическим процессам. Решение на временном шаге $t^j \leq t \leq t^{j+1}$ представим как последовательность двух более простых задач.

Алгоритм численной реализации состоит из следующих двух этапов.

1. Адвективно-диффузионный перенос субстанций с учетом давления и силы Кориолиса:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)u &= -\frac{\partial \pi}{\partial x} + \Delta u + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_u \frac{\partial u}{\partial z} \right) + lv, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)v &= -\frac{\partial \pi}{\partial y} + \Delta v + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_u \frac{\partial v}{\partial z} \right) - lu, \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)\omega &= -\frac{\partial \pi}{\partial z} + \lambda \theta + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_\omega \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) + \Delta \omega. \end{aligned} \quad (7)$$

2. Согласование мезометеорологических полей:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial \pi}{\partial x}, \quad \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial \pi}{\partial y}, \quad \frac{\partial \omega}{\partial t} = -\frac{\partial \pi}{\partial z}, \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)\theta + S\omega = -u(s\delta_x + \theta_x) - v(s\delta_y + \theta_y) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_\theta \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \Delta \theta \end{aligned} \quad (8)$$

с граничными условиями

$$\begin{aligned} u = f_1(y, z, t), \quad v = f_2(y, z, t), \quad \omega = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \quad \text{при} \quad x = 0, \quad 0 \leq y \leq Y, \\ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial u}{\partial x}, \quad \omega = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \quad \text{при} \quad x = X, \quad 0 \leq y \leq Y, \\ u = f_1(x, z, t), \quad v = f_2(x, z, t), \quad \omega = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0 \quad \text{при} \quad y = 0, \quad 0 \leq x \leq X, \\ \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\partial v}{\partial y}, \quad \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = 0, \quad \omega = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0 \quad \text{при} \quad y = Y, \quad 0 \leq x \leq X, \\ u = 0 \quad v = 0, \quad \theta = 0, \quad \omega = 0, \quad \pi = 0 \quad \text{при} \quad z = H, \\ \omega = 0, \quad h \frac{\partial u}{\partial z} = a_u u, \quad h \frac{\partial v}{\partial z} = a_u v, \quad h \frac{\partial \theta}{\partial z} = a_\theta (\theta - \theta_0) \quad \text{при} \quad z = h. \end{aligned}$$

Решение задачи (7) при $t = t_{j+1/2}$ служит начальным условием для задачи (8) при $t = t_j$.

Для изучения влияния на микроклимат города Усть-Каменогорска Шульбинского и Усть-Каменогорского водохранилищ взята область 50×50 км. Рельеф местности, размещение городских застроек и антропогенных источников, а также характеристики поверхности земли заданы как параметры моделей. Для получения этих параметров составлена база данных категории землепользования для этой области. Для учета влияния рельефа местности на микроклимат города Усть-Каменогорска создана база данных рельефа местности, с помощью которой получены электронные топографические карты города в форматах 2D и 3D, созданные в программном пакете MapInfo (рис. 1). С помощью численных экспериментов проанализированы условия образования и исчезновения инверсионных



Рис. 1. Электронные топографические карты города Усть-Каменогорска.

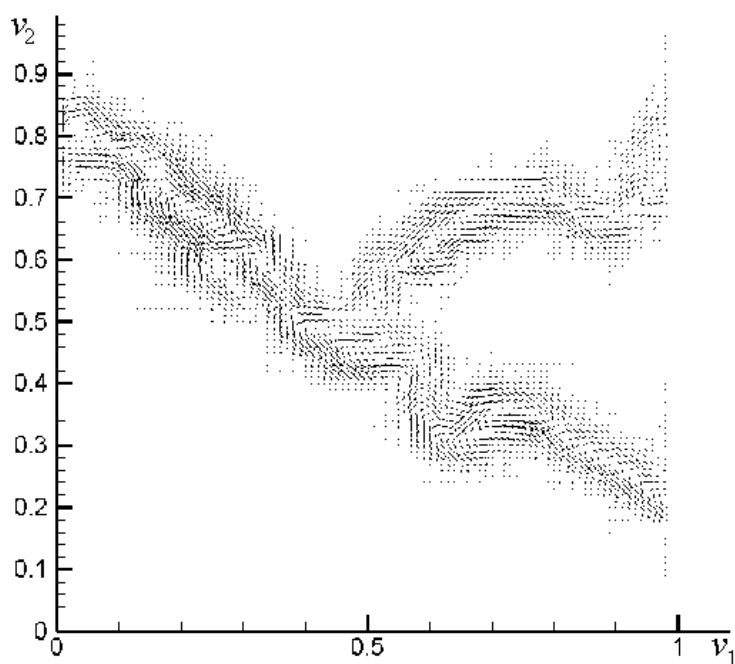


Рис. 2. Влияние рельефа и водных поверхностей на пульсации скорости ветра.



Рис. 3. Картина рассеивания примесей вредных веществ в атмосферном воздухе города.

ситуаций над городом под воздействием внешнего ветра и искусственных источников тепла, влияние на микроклимат города разности температур на поверхностях воды и суши. На рис. 2 показаны пульсации скорости ветра, полученные при решении полной модели динамики атмосферы для города Усть-Каменогорска. На рис. 3 показана возможность отображения результатов расчета распространения вредных выбросов от автотранспорта и промышленных предприятий города в приземном слое, определенных в 10 000 узловых точках средствами геоинформационной системы MapInfo. MapInfo позволяет отобразить на карте города картину рассеивания вредных примесей и определить среднее значение выбросов, оседающих на поверхности земли в любой точке города.

Список литературы

- [1] МАРЧУК Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982. 319 с.
- [2] ПЕНЕНКО В.В., АЛОЯН А.Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 254 с.
- [3] БЕРЛЯНД М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 448 с.
- [4] НЬИСТАДТ Ф.Т.М., ВАН ДОП Х. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 350 с.

Поступила в редакцию 9 ноября 2006 г.