



УДК 502.3:519.8(574.42)

**Ф.Н. Абдолдина, Н.М. Темирбеков**  
ВКГУ им. С.Аманжолова, г. Усть-Каменогорск

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ  
ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ ГОРОДА**

Атмосферная турбулентность, связанная с загрязнением воздуха различными примесями, происходит в планетарном пограничном слое. Возникновение и формирование пограничного слоя является результатом взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью, которая служит источником и стоком энергии и количества движения.

В пограничном слое энергия в виде тепла и влаги передается от подстилающей поверхности в атмосферу и обратно. Здесь сосредоточена вся биологическая активность живых организмов и производственная деятельность человека. Поэтому знание структуры пограничного слоя служит основой для установления способности атмосферы очищаться от вредных примесей. Все это служит убедительным доказательством необходимости глубокого изучения пограничного слоя как теоретическими, так и экспериментальными методами.

В настоящее время для описания процессов рассеяния примеси создан ряд математических моделей, основанных на уравнениях турбулентной диффузии. В зависимости от характерных пространственных масштабов исследуемых процессов переноса и диффузии разрабатываются различные типы моделей. Многие из них - кинематические модели, в которых компоненты вектора скорости ветра и другие метеорологические характеристики в модели не рассчитываются, а определяются из данных измерений [1, 2].

В данной работе излагается разработанный конечно-разностный метод и компьютерная программа для численного моделирования процесса рассеяния примесей от автотранспорта в атмосферном воздухе города.

Рассмотрим пространственную нестационарную численную модель пограничного слоя атмосферы, основанную на системе уравнений в возмущениях. Атмосферу формально разделим на два слоя: приземный слой и слой, находящийся выше. Исходную систему уравнений запишем в следующей форме [1]:

$$\frac{\partial u'}{\partial t} + \text{div} \bar{u} u' = -\frac{\partial \pi'}{\partial x} + l v' + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_u \frac{\partial u'}{\partial z} \right) + \Delta u' + \lambda \delta_x \theta', \quad (1)$$

$$\frac{\partial v'}{\partial t} + \text{div} \bar{u} v' = -\frac{\partial \pi'}{\partial y} - l u' + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_u \frac{\partial v'}{\partial z} \right) + \Delta v' + \lambda \delta_y \theta', \quad (2)$$

$$\frac{\partial \pi'}{\partial z} = \lambda \theta', \quad (3)$$

$$\frac{\partial \theta'}{\partial t} + \text{div} \bar{u} \theta' + S \omega' = -u' \tilde{\theta}_x - v' \tilde{\theta}_y + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_\theta \frac{\partial \theta'}{\partial z} \right) + \Delta \theta', \quad (4)$$

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

где  $\Delta = \frac{\partial}{\partial x} \mu_1 \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu_2 \frac{\partial}{\partial y}$ ;  $\vec{u}$  - вектор скорости ветра;  $\lambda, S$  - параметры конвекции и стратификации;  $\mu_1, \mu_2$  - горизонтальные коэффициенты турбулентности,  $\nu_w, \nu_\theta$  - 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;  $\tilde{\theta}_x, \tilde{\theta}_y$  - 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.

Граничные условия для системы (1) - (5) принимают следующий вид:

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

$$u = f_1(y, z, t), v = f_2(y, z, t), \theta = f_3(y, z, t) \quad \text{при } x = 0, 0 \leq y \leq Y,$$

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

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

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

где  $a_u = \frac{\varphi_u(\xi_h)}{f_u(\xi_h, \xi_0)}$ ,  $a_\theta = \frac{\varphi_\theta(\xi_h)}{f_\theta(\xi_h, \xi_0)}$ ;  $H$  - условная высота пограничного слоя атмосферы;

$X, Y$  - боковые границы области.

Основой для физического описания приземного слоя атмосферы выбрана теория подобия Монина-Обухова [3] и эмпирические функции из работы [4].

Характерный масштаб скорости, связанный с напряжением трения, называется динамической скоростью  $u_*$ . Использование  $\xi = z/L$  в качестве основного параметра при описании приземного слоя служит краеугольным камнем теории подобия Монина-Обухова.

Согласно этой теории, безразмерный сдвиг скорости ветра в инерционном подслое должен быть функцией  $\xi$ , так что

$$\chi z \frac{\partial |\vec{u}|}{\partial z} = u_* \varphi_u(\xi).$$

Отсюда следует, что

$$\chi |\vec{u}| = u_* f_u(\xi, \xi_u),$$

где  $\chi$  - постоянная Кармана,  $|\vec{u}| = \sqrt{u^2 + v^2}$  - модуль вектора скорости.

Аналогичные уравнения для температуры будут иметь вид:

$$z \frac{\partial \theta}{\partial z} = \theta_* \varphi_\theta(\xi), \quad (\theta - \theta_0) = \theta_* f_\theta(\xi, \xi_\theta).$$

Непрерывная универсальная функция  $f_u(\xi, \xi_u)$  находится с помощью функции  $\varphi_u(\xi)$ , для определения которой существует ряд моделей. Вид этой функции зависит от вида

рассматриваемой устойчивости и  $f_u(\xi, \xi_u), f_\theta(\xi, \xi_0)$  находятся по формуле

$$f_u(\xi, \xi_u) = \int_{\xi_u}^{\xi} \frac{\varphi_u(\xi)}{\xi} d\xi, \quad f_\theta(\xi, \xi_0) = \int_{\xi_0}^{\xi} \frac{\varphi_\theta(\xi)}{\xi} d\xi, \quad \xi = \frac{z}{L}, \quad L = \frac{u_*^2}{\lambda \chi^2 \theta_*},$$

где  $u_*$ ,  $\theta_*$  - масштабы скорости и потенциальной температуры,  $L$  - масштаб длины.

Нижние пределы интегрирования  $\xi_0$ ,  $\xi_u$  определяются следующим образом

$$\xi_h = \frac{h}{L}, \quad \xi_0 = \frac{\xi_h}{\tilde{H}}, \quad \xi_u = \frac{\xi_h}{\tilde{H}}, \quad \tilde{H} = \frac{h}{z_u},$$

где  $z_u$  - параметр шероховатости для ветра,  $h$  - высота приземного слоя.

При условии сильной устойчивости эмпирические функции определяются как линейные [4]

$$\varphi_u(\xi) = 1 + 4,7\xi, \quad \varphi_\theta(\xi) = 0,74 + 4,7\xi,$$

тогда

$$f_u(\xi, \xi_u) = \ln \frac{\xi}{\xi_u} + 4,7(\xi - \xi_u), \quad f_\theta(\xi, \xi_0) = 0,74 \ln \frac{\xi}{\xi_0} + 4,7(\xi - \xi_0).$$

Из вышеприведенных уравнений следует граничное условие при  $z = h$ .

Систему уравнений (1) – (6) будем решать методом расщепления по физическим процессам [5]. Алгоритм численной реализации состоит из следующих двух этапов.

Адвективно-диффузионный перенос субстанций.

$$\frac{u_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} - u_{i+1/2,j,k}^n}{\tau} + \text{div}_h \bar{u} u^n - \Delta_h u^n - (v_u u^n)_{z,i+1/2,j,k} - \lambda \delta_{x,i+1/2,j} \theta_{i,j,k}^n = 0, \quad (7)$$

$$\frac{v_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} - v_{i,j+1/2,k}^n}{\tau} + \text{div}_h \bar{v} v^n - \Delta_h v^n - (v_v v^n)_{z,i,j+1/2,k} - \lambda \delta_{y,i,j+1/2} \theta_{i,j,k}^n = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\theta_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} - \theta_{i,j,k+1/2}^n}{\tau} + \text{div}_h \bar{\theta} \theta^n - \Delta_h \theta^n - (v_\theta \theta^n)_{z,i,j,k+1/2} + u_{i+1/2,j,k}^n (S\delta_{x,i,j} + \bar{\theta}_{x,i,j}) - v_{i,j+1/2,k}^n (S\delta_{y,i,j} + \bar{\theta}_{y,i,j}) = 0. \quad (9)$$

Согласование мезометеорологических полей.

$$\frac{u_{i+1/2,j,k}^{n+1} - u_{i+1/2,j,k}^{n+1/2}}{\tau} - l v_{i,j+1/2,k}^{n+1} = -\pi_{x,i,j,k}^{n+1}, \quad (10)$$

$$\frac{v_{i,j+1/2,k}^{n+1} - v_{i,j+1/2,k}^{n+1/2}}{\tau} + l u_{i+1/2,j,k}^{n+1} = -\pi_{y,i,j,k}^{n+1}, \quad (11)$$

$$\frac{\theta_{i,j,k+1/2}^{n+1} - \theta_{i,j,k+1/2}^{n+1/2}}{\tau} + S \omega_{i,j,k+1/2}^{n+1} = 0, \quad (12)$$

$$\frac{\pi_{i,j,k+1}^{n+1} - \pi_{i,j,k}^{n+1}}{h_3} = \lambda \theta_{i,j,k+1/2}^{n+1}, \quad (13)$$

$$u_{\bar{x},i+1/2,j,k}^{n+1} + v_{\bar{y},i,j+1/2,k}^{n+1} + \omega_{\bar{z},i,j,k+1/2}^{n+1} = 0. \quad (14)$$

Разностные уравнения (10)-(14) решаются при соответствующих конечно-разностных аналогах граничных условий (6), например при  $z = h$ ,  $0 \leq x \leq X$ ,  $0 \leq y \leq Y$ ,

$$u_{i+1/2,j,1}^{n+1} = \frac{1}{1 + \frac{h_3 a_u}{h}} u_{i+1/2,j,2}^{n+1}, \quad v_{i,j+1/2,1}^{n+1} = \frac{1}{1 + \frac{h_3 a_v}{h}} v_{i,j+1/2,2}^{n+1}, \quad \omega_{i,j,1/2}^{n+1} = 0. \quad (15)$$

Из (10) и (11) получим

$$u_{i+1/2,j,k}^{n+1} = a \left( u_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} + l \tau v_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} - l \tau^2 \pi_{\bar{y},i,j,k}^{n+1} - \tau \pi_{x,i,j,k}^{n+1} \right), \quad (16)$$

$$v_{i,j+1/2,k}^{n+1} = a \left( v_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} - l \tau u_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} + l \tau^2 \pi_{\bar{x},i,j,k}^{n+1} - \tau \pi_{y,i,j,k}^{n+1} \right), \quad (17)$$

$$\omega_{i,j,k+1/2}^{n+1} = -b \pi_{z,i,j,k}^{n+1} + \frac{\theta_{i,j,k+1/2}^{n+1/2}}{S \Delta t}. \quad (18)$$

Подставляя (16), (17), (18) в (14) получим

$$\frac{a \tau}{h_1^2} \pi_{\bar{x}x,i,j,k}^{n+1} + \frac{a \tau}{h_2^2} \pi_{\bar{y}y,i,j,k}^{n+1} + \frac{b}{h_3} \pi_{\bar{z}z,i,j,k}^{n+1} = F,$$

где  $a = \frac{1}{1 + (l \Delta t)^2}$ ,  $b = \frac{1}{S \lambda \Delta t}$ ;

$$F = a u_{\bar{x},i+1/2,j,k}^{n+1/2} + a l \tau v_{\bar{x},i,j+1/2,k}^{n+1/2} + a v_{\bar{y},i,j+1/2,k}^{n+1/2} - a l \tau u_{\bar{y},i+1/2,j,k}^{n+1/2} + \frac{1}{S \Delta t h_3} \theta_{\bar{z},i,j,k+1/2}^{n+1/2}.$$

На боковой границе при  $x = 0$ ,  $0 \leq y \leq 1$ ,  $0 \leq z \leq 1$ , для определения давления решается следующее уравнение:

$$\begin{aligned} & \frac{a l \tau^2}{h_1 h_2} \cdot (\pi_{1,j+1,k}^{n+1} - \pi_{1,j,k}^{n+1}) + \frac{a \tau}{h_1^2} \cdot (\pi_{2,j,k}^{n+1} - \pi_{1,j,k}^{n+1}) + \frac{\tau_0}{h_2^2} \cdot (\pi_{1,j+1,k}^{n+1} - 2\pi_{1,j,k}^{n+1} + \pi_{1,j-1,k}^{n+1}) + \\ & + \frac{\tau_0}{h_3^2} \cdot (\pi_{1,j,k+1}^{n+1} - 2\pi_{1,j,k}^{n+1} + \pi_{1,j,k-1}^{n+1}) = \frac{a}{h_1} \cdot (u_{3/2,j,k}^{n+1/2} + l \cdot \tau \cdot v_{1,j+1/2,k}^{n+1/2} - f_1(y_j, z_k, t_{n+1})) + \\ & + \frac{1}{h_2} \cdot (v_{1,j+1/2,k}^{n+1/2} - v_{1,j-1/2,k}^{n+1/2}) + \frac{1}{h_3} \cdot (\omega_{1,j,k+1/2}^{n+1/2} - \omega_{1,j,k-1/2}^{n+1/2}). \end{aligned} \quad (19)$$

Из этого уравнения итерационным методом определяются значения  $\pi_{i,j,k}^{n+1}$ ,  $j = 1, 2, \dots, n_2 - 1$ ,  $k = 1, 2, \dots, n_3 - 1$  в приграничных узлах.

Рассмотрим уравнение переноса и диффузии примеси следующего вида:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \text{div } v \bar{u} \varphi + \delta \varphi = \frac{\partial}{\partial x} \mu_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} v \frac{\partial \varphi}{\partial z} + f.$$

Из уравнения баланса примесей на уровне шероховатости и из теории подобия [1, 3] было получено граничное условие

$$\varphi_0 = \frac{f_s + a_0 \varphi_h v_h}{\beta + a_0 v_h}.$$

Остальные граничные условия для концентраций пассивных примесей зададим в виде

$$v \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0, \quad \text{при } z = H; \quad \varphi = \varphi^0, \quad x = 0; \quad \frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0, \quad x = X;$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0, \quad y = 0; \quad \frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0, \quad y = Y; \quad \varphi = \varphi_0; \quad \text{при } t = 0.$$

Граничные условия, нормальные производные, равные нулю, означают, что отсутствует информация о фоновых значениях на боковых границах. Указанная постановка задачи имеет единственное решение.

Для оценки концентрации вредных веществ от автотранспорта в атмосферном воздухе города Усть-Каменогорска, на базе вышеприведенной турбулентной модели окружающей среды и разработанного конечно-разностного метода, создана новая компьютерная технология, которая объединяет две объектно-ориентированные программы «Emissions» и «Distribution» [6, 7]. Программа автоматически взаимодействует с графическим редактором «Surfer», позволяющим строить изолинии распространения концентраций вредных веществ в атмосфере.

Используя разработанную компьютерную технологию, были проведены численные эксперименты, в которых предполагалось, что  $\omega_g = 0$ . В качестве входных параметров использовались:  $\beta = 0,0001$ ,  $\mu_x = \mu_y = 1 \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $X = Y = 22000 \text{ м}$ ,  $\Delta x = \Delta y = 220 \text{ м}$ ,  $\Delta z = 2 \text{ м}$ ,  $\chi = 5$ ,  $s = 10 \text{ град/м}$ ,  $z_u = 0,001$ ,  $z_0 = 0,00001$ ,  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ ,  $\bar{\beta} = 100$ ,  $\delta = 0$ .

Результаты численного решения турбулентной модели пограничного слоя атмосферы города представлены на рис. 1 изолиниями распространения вредных примесей на высоте 4 метра при северо-восточном направлении ветра и скорости ветра 7 м/с.

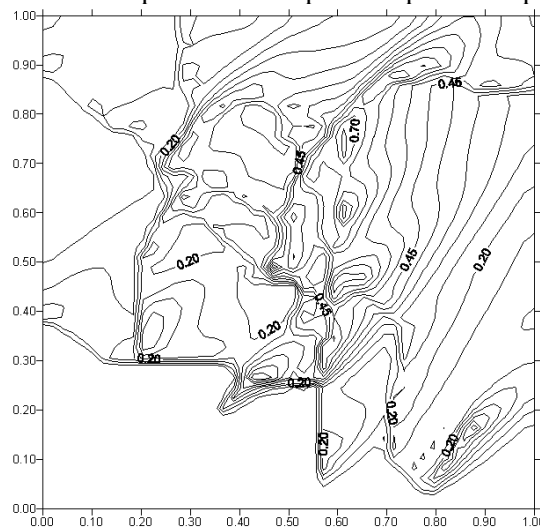


Рис. 1. Изолинии распространения примесей вредных веществ, выбрасываемых автотранспортом в атмосферный воздух города

#### 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. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Теория турбулентности. - Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 1992. - 618 с.
4. Ньистадт Ф.Т.М., Х.Ван Доп. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей. - Л.: Гидрометеоиздат, 1985. - 350 с.
5. Бакирбаев Б., Данаев Н.Т. Математическое моделирование процессов изменения клима-

- та под влиянием естественных и антропогенных факторов. – Алматы, Казак университети, 2002. – 315 с.
6. Темирбеков Н.М., Мадияров М.Н., Абдолдина Ф.Н., Малгаждаров Е.А. Компьютерная технология для оценки экологического состояния воздушного бассейна города, обусловленного транспортным процессом // Региональный вестник Востока. – №4 (24), – Усть-Каменогорск: Изд-во ВКГУ им. С. Аманжолова, 2004. – С. 3-11.
  7. Темирбеков Н.М., Абдолдина Ф.Н. Оценка загрязнения окружающей среды от автомобильного транспорта // Нефть и газ. – №1(25). – 2005. – Алматы: «Гылым», 2005. – С. 69-74.

Получено 11.05.05

УДК 666.9.242

**З.А. Естемесов, К. Сейтжанов**

ЦеЛСИМ, г. Алматы

**П.И. Садыков**

ВКГУ, г. Усть-Каменогорск

**ВОЗДЕЙСТВИЕ АЭРОПОЛЛЮТАНТОВ ТЭЦ НА ВОЗДУШНЫЙ БАССЕЙН  
И ОЦЕНКА ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО УЩЕРБА**

Выбросы ТЭЦ оказывают значительное антропогенное влияние на атмосферу.

В табл. 1 приведена оценка состояния воздушного бассейна при воздействии на него аэрополлютантов ТЭЦ, из которой видно, что первая и вторая зона (0...8 км) имеют чрезвычайно высокий уровень загрязнения. Особую опасность представляет первая зона в 0,7 км от источника выброса. В этой зоне интегральная оценка состояния воздушного бассейна в виде суммарного загрязнения атмосферы составляет 45,1 при нормативе менее 5, а суммарная опасность по концентрации  $SO_2+NO_2$  достигает 41,1; по  $CO_2$  + пыль – 20,2 при нормативе менее 1. Установлено, что нормативные требования соблюдаются лишь в третьей зоне (10-12 км), что свидетельствует о настоятельной необходимости значительного снижения концентрации выбросов в атмосферу путем замены очистительных сооружений на высокоэффективные установки или путем перевода ТЭЦ с угля на газ.

Известно [1], что для городов с населением 250 тыс. человек фоновая концентрация диоксида серы, оксида азота, оксида углерода и пыли должна соответствовать,  $mg/m^3$ :  $SO_2$  – 0,1;  $NO_2$  – 0,03;  $CO$  – 1,5; пыль – 0,2. Надо полагать, очистительные сооружения по своим характеристикам должны соответствовать этой фоновой концентрации.

Таблица 1. Оценка состояния воздушного бассейна под воздействием аэрополлютантов ТЭЦ

Дальность расстояния от источника выброса, км	Интегральная оценка состояния воздушного бассейна - $I_m$	«Суммарная» опасность аэрополлютантов – «С» по:	
		$SO_2+NO_2$	$CO_2+пыль$
0,35	36,74	34,5	15,7
0,7	45,1	41,1	20,2
1,0	29,1	24,6	14,4
5,0	16,7	13,8	7,2
8,0	6,7	4,5	2,9

10,0	3,5	1,8	1,8
12,0	1,1	0,7	0,4

Оценка воздействия загрязнений на прилегающую территорию ТЭЦ показывает, что сохранность экосистемы в основном нарушена. О сохранности экосистемы в прилегающей территории можно говорить только после второй зоны (0...8 км) от источника выброса.

Эколого-экономический ущерб определяется согласно нормативным документам.[2-4]. Оценка ущерба, причиняемого годовыми выбросами загрязнений (в 2003 г.) в атмосферный воздух ТЭЦ Казахстана, может быть установлена по формуле

$$Y_a = \gamma \cdot \sigma \cdot f \cdot M_a, \quad (1)$$

где:  $Y_a$  – оценка ущерба (тг/год);

$\gamma$  – множитель, численное значение которого равно 459 (тг/усл. т);

$f$  – поправка, учитывающая характер рассеивания примеси в атмосфере: для газовых веществ  $f = 0,5$ ; для пыли  $f = 2,5$ ;

$\sigma$  – коэффициент (безразмерный) относительной опасности загрязнения атмосферного воздуха над территориями различных типов, в данном случае – территория промышленная, поэтому  $\sigma = 4$ ;

$M_a$  – приведенная масса годового сброса загрязнений из источника, значение которой определяется по формуле:

$$M_a = \sum_{i=1}^N A_i \cdot m_i, \quad (2)$$

где  $m_i$  – масса годового выброса аэрополлютанта  $i$ -го вида в атмосферу, т/год; в данном случае:  $m_{CO_2} = 140\,327\,929$ ;  $m_{SO_2} = 2\,030\,305$ ;  $m_{NO_2} = 558\,362$ ;  $m_{пыль} = 1\,194\,251$ ;

$A_i$  – показатель относительной агрессивности примеси  $i$ -го вида, усл. т/т;

в данном случае  $A_{CO_2} = 1$ ;  $A_{SO_2} = 22$ ;  $A_{NO_2} = 41,1$ ;  $A_{пыль} = 41,5$ ;

$N$  – общее число примесей, выбрасываемых источником в атмосферу, в данном случае  $N = 4$ .

Подставляя значения, определяем приведенную массу годового выброса ( $M_a$ ):

$$M_a = 1 \cdot 140\,327\,929 + 22 \cdot 2\,030\,305 + 41,1 \cdot 558\,362 + 41,5 \cdot 1\,194\,251 = 257\,504\,734 \text{ усл. т/год.}$$

Ущерб, причиненный ТЭЦ Казахстана в 2003 г. выбросами загрязнений в атмосферу, составил:

$$Y_a = 459 \cdot 4 \cdot 2,5 \cdot 257\,504\,734 = 1,2 \text{ млрд тг/год.}$$

По данным, приведенным в работах [5, 6-8], экономический ущерб от выбросов загрязняющих веществ в атмосферу имеет определенные закономерности распределения (табл. 2).

Таблица 2. Распределение экономического ущерба по видам объекта

Вид объекта народного хозяйства	Распределение ущерба, % [6]	Эколого-экономический ущерб по видам объекта, млн тенге
Ухудшение здоровья населения (здравоохранение)	36	432
Жилищно-коммунальное и	32	384

бытовое хозяйство		
Сельское и лесное хозяйство	12	144
Промышленность и транспорт	13	156
Прочие сферы	7	84
<b>Итого:</b>	<b>100</b>	<b>1,2 млрд.</b>

Из этой таблицы видно, что выбросы ТЭЦ в наибольшей степени наносят ущерб здравоохранению, жилищно-коммунальному и бытовому хозяйствам, который соответственно составляет, % (млн. тг): 36 (432) и 32 (384). Далее идут: промышленность и транспорт – 13 (156); сельское и лесное хозяйство – 12 (144). Антропогенные воздействия выбросов ТЭЦ на прочие сферы достигают 7 (84 млн тг).

Из сказанного следует, что самыми уязвимыми при воздействии выбросов ТЭЦ являются здоровье человека и его жилище, что делают их (выбросы) наиболее опасными для экосистемы.

В табл. 3 приведены данные об эколого-экономическом ущербе, наносимом народному хозяйству аэрополлютантами ТЭЦ при сжигании 1 т угля в топке, показана доля общего ущерба по видам аэрополлютантов. Установлено, что при сжигании 1 т угля общий ущерб, наносимый оксидом углерода, достигает 42 900 тг/т, оксидом азота – 503,4, диоксидом серы – 1206,4, пылью – 608,4.

Таблица 3. Эколого-экономический ущерб, наносимый народному хозяйству аэрополлютантами ТЭЦ при сжигании 1т угля

Аэрополлютанты	Удельные выбросы, кг/т	Ущерб от выброса, т/кг [6]	Общий ущерб, тг/т	Доля от общего ущерба, %
Оксид углерода	2200	19,5	42900	95
Оксид азота	8,8	57,2	503,4	1,0
Диоксид серы	32	37,7	1206,4	3,0
Пыль (зола)	18	33,8	608,4	1,0

Подытоживая сказанное, можно констатировать следующее:

- выбросы ТЭЦ наносят народному хозяйству огромный ущерб, исчисляемый 1,2 млрд т/год;
- причем этот вред по объектам народного хозяйства распределен неравномерно;
- в наибольшей степени негативное воздействие выбросов ТЭЦ влияет на здоровье человека, растут показатели заболеваемости;
- перевод ТЭЦ Казахстана на современную технологию сжигания твердых топлив является насущной проблемой.

Список литературы

1. Кривошеин Д.А., Муравей Л.М., Роева Н.Н. и др. Экология и безопасность жизнедеятельности. – М.: ЮНИТИ – ДАНА, 2000. – 447 с.
2. Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды. – М.: Экономика, 1986. – 94 с.
3. Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления



- природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды. – М.: ЦЭМИ АН СССР, 1983. – 124 с.
4. Типовая методика определения экономической эффективности экономического стимулирования осуществления природоохранных мероприятий и экономической оценки ущерба от загрязнения окружающей среды. – М.: АН СССР, 1987. – 266 с.
  5. Соркин Я.Г. Особенности переработки сернистой нефти и охрана окружающей среды. – М.: Химия, 1975. – 293 с.
  6. Соркин Я.Г. Безотходное производство в нефтеперерабатывающей промышленности. – М.: Химия, 1983. – 200 с.
  7. Балацкий О.Ф. Экономика чистого воздуха. – Киев: Наукова думка, 1979. – 262 с.
  8. Методические указания для проведения исследований в основных отраслях промышленности по определению удельных выбросов вредных веществ в атмосферу на единицу продукции. – М.: НИИПИИ, 1978. – 28 с.

Получено 18.04.05

---

УДК 504.3. 551.5.574

**А.С. Чурсин**

ВКГУ, г. Усть-Каменогорск

**М.Т. Ипалакова**

ВКГТУ, г. Усть-Каменогорск

#### НЕКОТОРЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОГНОЗУ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ Г. УСТЬ-КАМЕНОГОРСКА

В условиях крупных промышленных городов уровень загрязнения приземного слоя воздуха зависит не только от количества промышленных и транспортных выбросов, но и от их вертикального и горизонтального рассеивания, которое определяется в основном метеорологическими факторами. Прогноз метеоусловий, способствующих рассеиванию или накоплению вредных примесей в приземном слое воздуха, может стать основой нормирования выброса и обеспечения чистоты воздушного бассейна.

С 1974 года отделом гидрометеорологических прогнозов Восточно-Казахстанского центра гидрометеорологии ежедневно составляется прогноз общего уровня загрязнения атмосферы Усть-Каменогорска на следующие сутки. При составлении прогноза в основном используется синоптико-статистический метод и данные концентрации вредных примесей в атмосфере за предшествующие сутки. Практически не проводится расчет прогностических параметров, влияющих на распределение вредных выбросов в приземном слое воздуха на территории городов.

Метеорологический потенциал загрязнения атмосферы определяется синоптическим процессом, влияющим однозначно на большой район.

Прогноз конкретного уровня загрязнения воздуха отдельного города с детализацией по ингредиентам должен разрабатываться с учетом местных условий и степени эффективности прогноза метеорологических параметров, влияющих на рассеяние промышленных выбросов. И, конечно, на современном этапе такой прогноз не может превышать суточной заблаговременности.

В результате взаимного наложения и перемешивания выбросов многих источников формируется общегородское загрязнение воздуха. В связи с этим большие концентрации могут отмечаться вне зоны прямого действия отдельных источников выбросов вредных веществ в атмосферу. Загрязнение воздуха может под влиянием метеорологических усло-

вий одновременно изменяться на всей территории города. Оно характеризуется обобщенными (интегральными) показателями, которые рассчитываются по материалам фактических наблюдений.

Основным принципом разработки вопросов прогнозирования загрязнения воздуха в городе, в том числе разработки статистических схем прогноза, является максимальный учет характера физического процесса распространения примесей в атмосфере и особенностей влияния метеорологических условий на концентрации примесей в воздухе [1].

Изучение метеорологических условий загрязнения воздуха является основой для его прогнозирования, поскольку задача состоит в том, чтобы предсказывать, предотвращать высокие уровни концентраций, создаваемые при неблагоприятных метеорологических ситуациях.

Для наиболее полного учета физического процесса загрязнения воздуха в городе при разработке вопросов его прогноза следует учитывать возможную асинхронность связей между концентрациями и метеорологическими параметрами. То есть сначала устанавливаются какие-то метеорологические условия, и только через некоторое время формируется соответствующий им уровень загрязнения воздуха.

Близкий по физическому смыслу к средней по всему городу нормированной концентрации примеси является параметр  $P$  [2], который в настоящее время широко применяется в оперативной работе и при выполнении исследований,

$$P = \frac{m}{n},$$

где  $m$  – количество измеренных за день концентраций примесей, превышающих в 1,5 раза среднесезонные значения ( $q$ );

$n$  – общее количество измеренных концентраций в течение этого же дня.

Параметр  $P$  может рассчитываться как для отдельных примесей (пыли,  $SO_2$ ,  $NO_2$  и др.), так и для суммаций,  $P$  может меняться от 0 до 1.

Статистическое распределение  $P$  в разных городах различается, однако чаще всего в среднем  $P \approx 0,2$ . Таким образом, случаи с  $P > 0,2$  можно отнести к относительно повышенному загрязнению воздуха по городу в целом.

Анализ состояния загрязнения атмосферного воздуха в Усть-Каменогорске, выполненный по материалам наблюдений Восточно-Казахстанского центра по гидрометеорологии за 1974-2004 гг., и типизация синоптических ситуаций, показывает, что к группе высокого загрязнения, с возникновением которого связано временное снижение выбросов на предприятиях города, можно отнести  $P > 35$ . В эту группу входит около 20-25% всех случаев загрязнения атмосферного воздуха в Усть-Каменогорске в течение года.

Синоптические ситуации, определяющие уровень загрязнения воздуха в городе, успешно предсказываются существующими способами. Однако анализ синоптических условий загрязнения воздуха связан с определенными трудностями. Часто затруднительна объективная физическая оценка ситуаций вследствие их большой изменчивости, а иногда – нечеткой выраженности. Поэтому целесообразно ориентироваться на наиболее устойчивые ситуации.

Наиболее важен анализ синоптических условий, определяющих формирование высоких уровней загрязнения воздуха, которые представляют повышенную опасность для здоровья людей и окружающей среды. К ним, в первую очередь, следует отнести длительные периоды с высоким уровнем загрязнения.

На степень воздействия метеорологических факторов на загрязнение воздуха большое

влияние оказывает своеобразие и особенности ороклиматических условий.

Следует отметить, что существующая структура пространственной организации города Усть-Каменогорска является нерациональной стихийно сложившейся. Пространственное взаимное расположение функциональных зон (в частности промышленной и селитебной) исторически сложилось хаотично без учёта естественного фона, метеорологических факторов и природных предпосылок миграции техногенных веществ в атмосферном воздухе, что способствует созданию над городом постоянно действующего поля высоких концентраций.

Кратковременное увеличение концентрации вредных примесей в приземном слое воздуха может быть обусловлено двумя основными причинами. Одна из них связана с резким возрастанием выбросов в атмосферу при аварийных ситуациях на производствах, неисправности очистных устройств, усиленных залповых выбросах.

Другой причиной являются неблагоприятные метеорологические условия. Они могут вызвать одновременное повышение концентрации примеси на значительной территории города. Отсюда следует, как важно своевременно предупреждать о наступлении периодов опасного загрязнения атмосферы.

Эффективность прогноза загрязнения воздуха в значительной мере определяется успешностью прогноза неблагоприятных метеорологических условий (НМУ), при котором могут достигаться наибольшие значения концентрации примеси при наименьших параметрах выброса её в атмосферу.

Как известно распределение примесей по территории города и их перенос на большие расстояния находится в тесной взаимосвязи с рядом метеорологических величин, характеризующих состояние приземного и пограничного слоя атмосферы [3].

Характеризуя распределение полей концентрации загрязняющих веществ по территории города, следует отметить, что посты наблюдений за загрязнением атмосферы (ПНЗ) расположены по территории города более или менее равномерно и охватывают районы наиболее интенсивного антропогенного влияния на атмосферный воздух. Для них был просчитан показатель загрязнения  $K_i$  по формуле:

$$K_i = \frac{\bar{q}_{cp}}{q^i_{cp}},$$

где  $\bar{q}_{cp}$  – средняя концентрация  $i$ -го вещества за рассматриваемый период на ПНЗ;

$q^i_{cp}$  – средняя концентрация в целом по городу.

Примерное их расположение относительно центральной части города таково: на северо-западе расположен ПНЗ 7 (железнодорожный вокзал), северо-востоке – ПНЗ 8, юге – ПНЗ 12, ПНЗ 1 и 5 – в центральной части города.

Как следует из табл.1 распределение концентрации загрязняющих веществ по территории примерно одинаковое. Вместе с тем наиболее низкие значения концентрации рассматриваемых веществ на ПНЗ 8 и 12, расположенных на северо-восточной и южной окраинах города. Как уже отмечалось выше, Усть-Каменогорск относится к наиболее загрязненным городам Казахстана, поэтому средняя концентрация примесей выше, чем предельно-допустимые концентрации в 2-4 раза и надо говорить о повсеместном высоком загрязнении города и его окрестностей.

Из этой таблицы, где приводятся суммарные показатели загрязнения атмосферы  $K = \sum K_i$ , видно, что наиболее загрязненными районами являются: северо-западная часть города (ПНЗ 1 и 7), где расположены основные источники выбросов. В течение года за-

грязнения атмосферного воздуха в городе распределяются равномерно, с незначительными отклонениями  $\pm 1$  ПДК в зависимости от преобладания типов атмосферной циркуляции.

Таблица 1. Распределение показателя загрязнения атмосферы  $K_i$  по территории Усть-Каменогорска

Загрязняющее вещество	ПНЗ 1	ПНЗ 5	ПНЗ 7	ПНЗ 8	ПНЗ 12
Пыль	1,3	1,0	1,0	0,5	1,0
SO <sub>2</sub>	1,2	1,1	0,9	0,8	0,9
CO	1,5	0,5	1,0	1,0	1,0
NO <sub>2</sub>	1,2	1,1	1,0	1,0	0,7
As	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Фенол	1,1	0,9	1,0	1,0	0,9
Формальдегид	1,6	1,0	1,3	1,0	0,4
Итого: $\Sigma K_i$	8,9	5,6	7,2	6,3	5,9

Делая выводы из вышесказанного, следует отметить, что атмосферный воздух испытывает наиболее интенсивное антропогенное воздействие. Поэтому более детальное исследование его состояния представляет большой интерес как с научной, так и с практической точек зрения.

Надо оценить распределение метеорологических показателей, влияющих на загрязнение атмосферы, и, наоборот, загрязнение атмосферного воздуха на повторяемость и интенсивность метеорологических явлений, и в частности туманообразования.

Для того чтобы обеспечить научно обоснованное управление качеством воздуха, необходима информация о выбросах вредных веществ, об уровнях загрязнения, их изменениях в течение длительного периода, а также о метеорологических условиях распределения примесей в атмосфере. Совместное рассмотрение этих сведений позволяет установить правильный диагноз состояния загрязнения воздушного бассейна и прогнозировать его на длительный период. При постоянном режиме выбросов вредных веществ колебания уровня загрязнения происходят под влиянием условий переноса и рассеивания примесей в атмосфере.

Повышение концентраций примесей в конкретном районе зависит от определённых сочетаний метеорологических параметров. Чем точнее установлено это сочетание, тем с большей надёжностью будут осуществляться предупреждения о возможном накоплении примесей в атмосферном воздухе.

Сочетание метеорологических параметров, определяющих возможный при заданных выбросах уровень загрязнения атмосферы, называют потенциалом загрязнения атмосферы (ПЗА). Различают метеорологический и климатический ПЗА. Поскольку формирование уровня загрязнения атмосферы связано с условиями вертикального и горизонтального переноса и рассеивания примесей, то ПЗА может представляться в различных сочетаниях метеорологических параметров, определяющих эти условия.

Связь между уровнем загрязнения воздуха и метеорологическими условиями очень сложна. Поэтому при исследовании причин формирования повышенного уровня загрязнения атмосферы используют не отдельные метеорологические характеристики, а ком-

плексные параметры, соответствующие определённой ситуации.

Анализ табл. 2 показывает, что в городе часто наблюдаются осадки, способствующие вымыванию примесей из атмосферы, но этого недостаточно, о чём свидетельствуют данные табл. 3. Преобладающими и способствующими усилению загрязнения города метеорологическими показателями являются большая повторяемость туманов и штилей.

Сопоставляя данные (табл. 2) с результатами расчетов среднемесячных показателей загрязнения атмосферы (табл. 3), отметим, что характер изменения метеорологических величин в целом практически удовлетворительно объясняет сезонный ход общего загрязнения атмосферы. Так, например, в холодный период (X-III) отмечено повышенное содержание SO<sub>2</sub> и наибольшее число дней с туманом.

Вследствие того, что метеорологические параметры, способствующие загрязнению атмосферного воздуха, во многом определяются атмосферными процессами, имеющими крупномасштабный характер, всё чаще делается попытка найти связь между загрязнением атмосферы и синоптическими ситуациями. Наряду с ветром, важнейшей характеристикой, определяющей условия распространения примесей, является вертикальное распределение температуры воздуха. Наличие слоев температурных инверсий препятствует вертикальному перемешиванию воздуха. При этом ограничивается объем воздуха, в который поступают примеси, содержащиеся в различных выбросах, и загрязнение усиливается. Инверсии могут начинаться непосредственно у земной поверхности (приземные инверсии) или с некоторой высоты (приподнятые инверсии).

Таблица 2. Повторяемость некоторых метеорологических показателей, влияющих на загрязнение атмосферы Усть-Каменогорска

Показатель	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Среднее за год
Температура, °С	-10,4	-11,5	-2,6	10,7	15,9	19,4	20,5	18,6	13,6	-6,4	-18,9	-14,6	3,9
Относительная влажность, %	73	73	81	62	58	50	55	59	50	62	76	85	6,5
Средняя скорость ветра, м/с	4,3	2,7	2,3	2,3	1,9	1,5	1,7	1,7	1,9	1,0	2,6	2,6	2,2
Повторяемость, %: штиль	39	47	49	48	42	34	35	45	53	73	39	46	46
Число дней с туманом	7	3	9	3	0	0	0	0	1	4	11	10	4
Число дней с осадками	15	11	13	5	8	7	7	10	2	3	14	20	10

Таблица 3. Среднемесячные концентрации загрязняющих веществ за период 1974-2004 гг. (мг/м<sup>3</sup>)

Загрязняющее вещество	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ПДКсс
SO <sub>2</sub>	0,262	0,234	0,223	0,207	0,185	0,215	0,229	0,236	0,224	0,200	0,214	0,228	0,05
CO	2,4	2,1	1,9	2,0	1,9	2,0	2,0	1,8	1,9	2,1	1,9	2,1	3,0
NO <sub>2</sub>	0,09	0,1	0,09	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,04
As	0,003	0,003	0,003	0,002	0,003	0,003	0,004	0,004	0,003	0,002	0,002	0,002	0,003

Влияние туманов на концентрацию и распределение примесей в воздухе весьма сложно. При туманах происходит качественное изменение состава примесей. Растворение в каплях тумана наиболее распространённого загрязнителя воздуха – диоксида серы – приводит к образованию аэрозоля сернистой кислоты и к частичному окислению его в более токсичную серную кислоту.

Высокие уровни загрязнения сернистым ангидридом характерны для Усть-Каменогорска. Средние годовые концентрации достигают 4-5 ПДК среднесуточных.

Наиболее высокие уровни загрязнения формируются при сочетании штилевых условий с туманами и инверсиями. Такое сочетание очень типично для города. 85% туманов наблюдается при штиле и 15% – при скорости ветра до 1-3 м/с.

Определённую роль в загрязнении приземного слоя воздуха может играть оседание крупных капель тумана, при котором растворённая примесь из вышележащих и часто очень загрязнённых слоёв переносится к подстилающей поверхности. Происходит явление, напоминающее кислотный дождь.

Анализируя полученные сведения можно сделать выводы:

1. Параметр *P* в нашем случае вполне отражает действительное состояние загрязнения воздуха в г. Усть-Каменогорске. Поэтому его прогноз и построение полей его изменения по территории города дает возможность более оперативно проводить прогноз неблагоприятных метеословий.

2. Выбросы основных источников загрязнения (УК МП АО "Казцинк", ОАО "УК ТЭЦ, Согринская ТЭЦ, ОАО "УК тепловые сети" и др.) при определенных метеорологических ситуациях не оказывают существенного влияния на изменение состояния загрязнения атмосферного воздуха города Усть-Каменогорска, т.к. они относительно постоянны. Основное внимание необходимо уделять изменению метеорологических параметров. И этот вопрос требует дальнейшего более глубокого детального изучения, моделирования синоптических и метеорологических процессов.

#### Список литературы

1. Методические указания по прогнозу загрязнения воздуха в городах. - Алма-Ата, 1987. - 32 с.
2. М.Е. Берлянд. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. - Ленинград: Гидрометиздат, 1985. - 271 с.
3. Прогноз высоких уровней загрязнения воздуха в городах и регионах. Прогноз загрязнения воздуха на трое суток. (Методические рекомендации). - Санкт-Петербург: Гидрометиздат, 2001. - 32 с.

Получено 7.06.05

70 *жас*  
*лет*



**КУТТЫКТАЙМЫЗ!  
ПОЗДРАВЛЯЕМ!**



**ВОРОБЬЕВА**

**ИВАНА ТИМОФЕЕВИЧА,**  
старшего преподавателя  
кафедры подземной разработки и геологии

**ЗДОРОВЬЯ, СЧАСТЬЯ, УСПЕХОВ, ДОРОГОЙ ЮБИЛАР!**

•

**МЕРЕЙТОЙ ИЕСІНЕ МЫКТЫ ДЕНСАУЛЫК, ТАУСЫЛМАС БАҚЫТ,  
ТВОРЧЕСТВОЛЫК ТАБЫС ТІЛЕЙМІЗ!**

