

П.Н. Белов

**МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ПРИМЕСЕЙ,  
ВЫБРАСЫВАЕМЫХ АВТОТРАНСПОРТОМ**

Модель основана на уравнении переноса примесей, которое решается при граничных условиях у земной поверхности и при условии стационарности процесса. Выбросы примеси автотранспортом вводятся в модель как линейные низкие холодные источники. При этом линейные источники имитируются набором точечных.

Приводятся примеры расчетов концентраций окиси углерода и окислов азота на оживленных автотрассах типа Томск–Новосибирск и Новосибирск–Омск.

Автомобильный транспорт является одним из главных источников загрязнения атмосферы. В России в атмосферу автотранспортом в 1993 г. было выброшено 19 млн. т различных загрязняющих веществ [8], что составляет примерно 40% всех антропогенных загрязнений.

В число загрязняющих веществ от автотранспорта входят: окись углерода (CO) – 14,7, окислы азота (No<sub>x</sub>) – 0,95, углеводороды (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>) – 33,5 млн. т. Кроме того, высокотоксичные соединения свинца, сернистый газ (SO<sub>2</sub>), а также различные отходы нефтепродуктов [1, 8].

Загрязнение атмосферы от автотранспорта происходит в городах, где выбросы распределены в основном вдоль проезжих улиц, а также на автотрассах.

Существуют различные методики расчетов концентрации примесей от автотранспорта, изложенные, например, в работах [5, 6]. В этой статье рассматривается загрязнение вдоль прямолинейных участков дорог (в городе это улицы длиной порядка 1 км, а вне города – автотрассы протяженностью до сотен километров).

Особенностью предлагаемой методики является простота реализации для конкретных участков дорог. Источники выбросов примесей от автотранспорта считаются «холодными» и линейными. Линейные источники могут быть имитированы набором точечных источников.

В различных типах автомобилей [1] выбросы газа происходят на расстоянии порядка десятков сантиметров от поверхности дороги. Поэтому такие выбросы будем считать наземными, происходящими практически при  $z = 0$ . Поскольку выбросы являются «холодными», будем считать, что их перемешивание по вертикали происходит во внутреннем (приземном) пограничном слое (ВПС) высотой  $h$ . Эта высота может быть рассчитана с помощью теории пограничного слоя [3].

В основу предлагаемой методики положено уравнение переноса примеси в пограничном слое, которое для усредненных по слою толщиной  $h$  величин

$$\bar{s} = \frac{1}{h} \int_0^h s(z) dz, \quad \bar{u} = \frac{1}{h} \int_0^h u(z) dz$$

и т.д. и при направлении оси  $x$  вдоль вектора ветра имеет вид [3]:

$$\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{s}}{\partial x} + \delta \bar{s} - k_y \frac{\partial^2 \bar{s}}{\partial y^2} = \bar{\varepsilon} + \frac{1}{h} f, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – приток примеси в слое  $h$ ;  $f = f(x)$  – наземные источники, находящиеся вдоль дороги;  $\sigma$  – параметр модели, о котором пойдет речь далее.

Решение уравнения (1) будем искать для стационарного случая ( $\partial s / \partial t = 0$ ) и в отсутствие других источников примеси кроме источников  $f$  при заданных параметрах модели:  $\sigma$ ,  $u$ ,  $k$ . При указанных условиях уравнения (1) перепишем в виде (знак усреднения далее опускается)

$$\frac{\partial s}{\partial x} + \frac{\delta}{u} s - \frac{k_y}{u} \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} = \varphi, \quad (2)$$

где  $\varphi = (1/h)f$ ;  $k_y = a^2 u x$  – коэффициент турбулентности относительно оси  $y$ ;  $a$  – коэффициент ( $\sim 10^{-2}$ );  $\sigma = \sigma_1 = \alpha_0 \beta / h$ ;  $\beta$  – коэффициент при сухом поглощении примеси поверхностью;  $\alpha_0$  – эмпирический коэффициент.

Для решения уравнения (2) ставятся следующие условия:

$$\text{при } x = y = 0 \quad s = s_0, \quad \text{при } x \rightarrow \infty \text{ и } y \rightarrow \infty \quad s \rightarrow 0. \quad (3)$$

Решение уравнения (2) будем искать для трех вариантов:

1. Ветер направлен поперек дороги (оси  $x$ ), распределение источников вдоль дороги (оси  $y$ ) на заданном отрезке по оси  $y$  равномерно, что позволяет для этого варианта считать, что  $\partial^2 s / \partial y^2 = 0$ .

2. Ветер направлен вдоль дороги, т.е. вдоль оси  $x$ .

3. Ветер направлен относительно дороги под углом  $\alpha$ .

В первом варианте уравнение (2) упрощается и принимает вид

$$\frac{ds}{dx} + \frac{\delta}{u} s = \frac{1}{h} f. \quad (4)$$

Решение этого уравнения при первом из условий (3) запишется в виде

$$s(x) = s_0 e^{-(\sigma/u)x} \quad (5)$$

(ось  $x$  здесь направлена вдоль ветра и поперек дороги). Начальная концентрация  $s_0$  при  $x = y = 0$  и при указанных параметрах определена по соотношению

$$s_0 = f d_0 / u h, \quad (6)$$

где  $d_0$  – ширина дороги ( $d_0 \sim 10$ – $20$  м). Например, при  $f = f_1 = 1$  мг/(м<sup>2</sup>с),  $h = 40$  м,  $u = 7$  м/с,  $d_0 = 20$ ,  $\alpha_0 = 2$   $s_0 = 71$  мкг/м<sup>3</sup>. Эти величины относятся к окиси углерода, для которого  $\beta = 0,5$  см/с. Для окислов азота, для которого  $f = 0,1$  мг/(м<sup>2</sup>с), а  $\beta = 1$  см/с,  $s_0 = 14,4$  мкг/м<sup>3</sup>.

В табл. 1 приведены рассчитанные по соотношению (5) концентрации окиси углерода (СО) и окислов азота (NO<sub>x</sub>) при указанных условиях и различных расстояниях  $x$  от дороги. Из данных таблицы следует, что концентрация примеси при увеличении расстояния от дороги по оси  $y$  на подветренной стороне быстро убывает; на расстоянии 10 км от дороги она составляет 50–70%, а на расстоянии 50 км – 3–17% от ее значения на оси дороги, на расстоянии 100 км имеются лишь «следы» примеси. (На наветренной стороне дороги концентрация примеси равна нулю.)

Таблица 1

**Значение концентрации окиси углерода (СО) и окислов азота (NO<sub>x</sub>)  $s(x)$  в зависимости от расстояния  $x$  от автодороги при ветре, направленном поперек дороги, а также отношения  $s(x)/s_0$ , где  $s_0$  – концентрация примеси на дороге ( $u = 7$  м/с,  $d_0 = 20$  м,  $h = 40$  м,  $\alpha_0 = 2$ )**

$x$ , км	0	1	10	50	100
Окись углерода ( $\beta = 0,5$ см/с, $\sigma_1 = 2,5 \cdot 10^{-4}$ с <sup>-1</sup> , ПДК = 3000 мкг/м <sup>3</sup> )					
$s(x)/s_0$ , %	100	97	70	17	3
$s(x)$ , мкг/м <sup>3</sup>	142	138	100	24	4
Окись азота ( $\beta = 1$ см/с, $\sigma_1 = 3 \cdot 10^{-4}$ с <sup>-1</sup> , ПДК = 85 мкг/м <sup>3</sup> )					
$s(x)/s_0$ , %	100	93	49	3	0,07
$s(x)$ , мкг/м <sup>3</sup>	14,4	12,2	7,1	4,3	0,1

Во втором варианте ветер направлен вдоль дороги, по оси  $x$  ищется решение уравнения (2) при условиях (3). Это решение, найденное с помощью разделения переменных и с использованием метода вариации постоянных [7], записывается в виде

$$s(x, y) = P(x, y) s'_0 \exp[-(\sigma/u)x] + \int_0^x \exp[-(\sigma/u)(x-x')] \frac{f(x')}{u h \beta} dx', \quad (7)$$

где функция

$$P(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y(x)}} \exp(-y^2/2\sigma_y^2(x)), \quad (8)$$

а  $s'_0$  – значение примеси при  $x = y = 0$  от линейного источника;  $\sigma_y^2 = \sigma_y^2(x) = (ax)^2$  – дисперсия расстояний частиц примеси по оси  $y$  от оси  $x$ ,  $a \sim 10^{-2}$  – эмпирический коэффициент.

При практической реализации решения (7) обнаруживается, что вклад члена с концентрацией  $s'_0$  при увеличении расстояния  $x$  быстро уменьшается и при расстоянии  $x$  более нескольких километров его можно не учитывать. Определенный же интеграл в решении (7) вычисляется методом прямоугольников. С этой целью на прямолинейном участке дороги протяженностью  $L$  введем точки  $x_n = n\Delta x$ , где  $\Delta x$  – шаг по оси  $x$ . Тогда для оси «факела» примеси ( $y = 0$ ) определенный интеграл в решении (7) представим в виде

$$s(x_n) = \frac{\Delta x}{uh} \sum_{n'-1}^n \exp[(\sigma_1/u)(\Delta x/2)] f(x_{n'-1/2}), \quad (9)$$

$n = 1, 2, \dots$

В табл. 2 приведены результаты расчетов концентрации окиси углерода и окиси азота для прямолинейного участка трассы протяженностью  $L$  км, имитирующей трассу Томск–Новосибирск или Новосибирск–Омск. Распределение потоков примеси вдоль дороги можно представить в виде

$$f(a) = f_{\min} + 1/2(f_0 - f_{\min})(1 + \cos(2\pi/L)x), \quad (10)$$

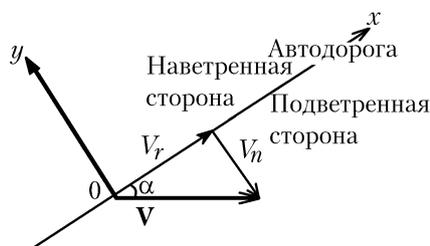
где  $f_0$  – значение  $f$  в начале и конце трассы, т.е. при  $x = 0, L$ ;  $f_{\min}$  – значение  $f$  в середине трассы, т.е. при  $L/2$ . Такое распределение принято из соображений, что в начале и конце трассы, т.е. при  $x = 0, L$  (крупные города), выбросы автотранспорта максимальны, а в середине трассы, где поток машин вследствие «развилок» уменьшается, – минимальны. При этом было принято, что для  $\text{CO}$   $f_1 = 1$  мг/(м<sup>2</sup>с), а для  $\text{NO}_x$  – 0,1 мг/(м<sup>2</sup>с).

Таблица 2

**Значение потока примеси от автодороги  $f$  (мг/м<sup>2</sup>·с) и концентрации примеси  $s(x)$  (мкг/м<sup>3</sup>) на оси «факела» ( $y = 0$ ) при различных расстояниях от начала автодороги ( $x$ , км) ( $u = 7$  м/с,  $d_0 = 20$  м,  $h = 40$  м,  $\alpha_0 = 2$ )**

$x$ , км	0	20	40	60	80	100	120
Окись углерода ( $\beta = 0,5$ см/с, $\sigma_1 = 2,5 \cdot 10^{-4}$ с <sup>-1</sup> , ПДК = 3000 мкг/м <sup>3</sup> )							
$f(x)$ , мг/(м <sup>2</sup> ·с)	1,00	0,933	0,750	0,500	0,750	0,933	1,00
$s(x)$ , мкг/м <sup>3</sup>	–	47	84	108	160	193	240
Окислы азота ( $\beta = 1$ см/с, $\sigma_1 = 5 \cdot 10^{-4}$ с <sup>-1</sup> , ПДК = 85 мкг/м <sup>3</sup> )							
$f(x)$ , мг/(м <sup>2</sup> ·с)	0,100	0,093	0,075	0,050	0,075	0,093	0,100
$s(x)$ , мкг/м <sup>3</sup>	–	3,3	6,0	7,6	10,3	13,5	20,3

По данным таблицы можно проследить, каким образом изменяется концентрация примеси при увеличении расстояния  $x$  вдоль ветра.



Геометрические соотношения между направлениями ветра и автодороги.  $V$  – вектор ветра;  $V_n$  и  $V_r$  – проекции вектора ветра на направление автодороги  $x$  и на нормаль к ней (ось  $y$ );  $\alpha$  – угол между направлением дороги и вектором ветра

С помощью функции  $P(x, y)$  по соотношению (8) можно оценить изменение концентрации поперек дороги, т.е. по оси  $y$ , как на наветренной, так и на подветренной сторонах дороги. Так, отношение концентрации при расстояниях  $y = 10, 20$  и  $30$  м от дороги по отношению к ее значению на оси «факела» составило 70, 25 и 4% соответственно.

В третьем варианте, когда направление ветра составляет угол  $\alpha$  с направлением дороги (рисунок), расчеты производятся дважды: при ветре вдоль и поперек дороги. Значения концентрации в любой произвольной точке  $(x, y)$  в окрестности дороги затем получаются путем сложения.

1. Акимов И. Л., Аксенов В. И. Транспорт и охрана окружающей среды. М.: Транспорт, 1986. 176 с.
2. Белов П. Н. Учет орографии в тракторной модели переноса примесей в пограничном слое атмосферы// Метеорология и гидрология. 1993. N 9. С. 14–19.
3. Белов П. Н., Комаров В. С. Теоретическая модель переноса примесей в пограничном слое атмосферы// Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 2. С. 195–203.
4. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 272 с.
5. Берлянд М. Е., Генихович Е. Л., Грачева И. Г. и др. Об усовершенствовании методов расчета загрязнения атмосферы// Труды ГГО. 1987. Вып. 511.
6. Берлянд М. Е., Генихович Е. Л., Оникул Р. И. Моделирование загрязнения атмосферы выбросами из низких и холодных источников// Метеорология и гидрология. 1990. N 5. С. 5–17.
7. Степанов В. В. Курс дифференциальных уравнений. М.: Гостехиздат, 1953. 468 с.
8. Шеховцев А. А., Звонов В. Н., Чижов С. Г. Влияние отраслей народного хозяйства на состояние окружающей среды в 1993 году. М.: Издательский центр «Метеорология и гидрология», 1995. 122 с.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию  
12 декабря 1995 г.

**P. N. Belov. Model of Propagation of Atmospheric Impurities Ejected by Motor Transport.**

The bases of the model is the equation of the impurity propagation, which can be solved under limiting conditions nearby the Earth surface and under the condition that the process is stationary. The impurities ejected by motor transport are introduced into the model as the linear low cold sources. The linear sources are simulated therewith by a set of point sources. The examples of the calculated  $\text{CO}_2$  and  $\text{NO}_2$  concentrations on overcrowded roads between Tomsk and Novosibirsk towns as well as between Novosibirsk and Omsk are presented.