

П.Н. Белов, В.С. Комаров

## МАКСИМАЛЬНЫЕ УРОВНИ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В ГОРОДАХ ПРИ СИНОПТИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ ЗАСТОЯ ВОЗДУХА

Максимальные уровни загрязнений наблюдаются в городах при синоптической ситуации застоя воздуха при слабых ветрах и приземной инверсии температуры. В статье изложен теоретический способ определения концентраций токсических веществ в городах при такой ситуации. Приводятся и обсуждаются примеры расчетов максимальных концентраций загрязняющих веществ в ряде городов Сибири, в которых синоптическая ситуация застоя воздуха наблюдается наиболее часто.

Для оценки экологической обстановки в городах важное значение имеет уровень загрязненности воздуха. Последний определяется в первую очередь количеством выбросов в атмосферу вредных загрязняющих веществ промышленными и другими производствами. Однако существенную роль играют также и метеорологические условия. Бывают такие условия, когда при одних и тех же выбросах примесей их концентрация в воздухе увеличивается во много раз.

К числу подобных метеорологических условий относятся, в частности, синоптические ситуации застоя воздуха, при которых при скорости ветра у земли 0–1 м/с наблюдается приземная инверсия температуры. Такая ситуация возникает обычно при наличии стационарного антициклона. Повторяемость ситуаций застоя воздуха наиболее высока в Сибири (табл. 1) [1]. Из этой таблицы видно, что зимой их повторяемость, например в Иркутске, может достигать 55%, а в Чите даже 68%.

Таблица 1

Повторяемость (%) синоптических ситуаций застоя воздуха при скорости ветра 0–1 м/с у земной поверхности и приземной инверсии в городах Сибири

Город	Месяц			
	Январь	Апрель	Июль	Октябрь
Омск	14	10	15	8
Новосибирск	15	8	10	4
Красноярск	47	22	31	30
Братск	39	32	34	14
Иркутск	55	14	16	29
Чита	68	24	23	41

Такие ситуации возникают также и в других районах России, например в Москве их повторяемость весной достигает 30%.

Высокие уровни концентраций вредных веществ являются особо опасными для здоровья человека и состояния природной среды, поэтому методам оценки концентраций примесей при таких ситуациях должно уделяться особое внимание. Однако такие методы еще практически не разработаны. Можно отметить лишь работу М.Е. Берлянда и О.И. Куренбина, в которой предложен способ расчета концентраций примеси при штиле [2].

В данной статье предложен простой и весьма эффективный способ расчета концентрации веществ при наличии одновременно штиля и приземной инверсии, т.е. при синоптической ситуации застоя воздуха. Способ основан на решении упрощенного уравнения баланса примеси [3, 4], который применительно к величинам, осредненным по слою вертикального перемешивания (ВСП) толщиной  $H$  или по приземному слою толщиной  $h$ , можно при стационарном процессе записать в виде

$$-k_1 \Delta s + \sigma s = E, \quad (1)$$

где  $s$  – концентрация вещества;  $k_1$  – коэффициент турбулентной вязкости при перемещениях по горизонтали;  $\Delta = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$  – оператор Лапласа;  $E$  – приток или сток примеси, т.е. скорость поступления или исчезновения примеси;  $\sigma = \beta/H$  или  $\sigma = \beta/h$  (здесь  $\beta$  – скорость поглощения примеси земной поверхностью).

Уравнение (1) является неоднородным уравнением Гельмгольца. Наиболее простое точное его решение можно получить для круговой области радиуса  $r = R$  при граничном условии

$$\text{при } r = R \quad s = \bar{s}, \quad (2)$$

где черта сверху означает осредненную величину  $s$  при  $r = R$ .

Решение уравнения в полярной системе координат  $(r, \varphi)$  при условии (2) можно записать в виде [5]:

$$s(r=0) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{E}{k_1} G_1 r dr d\varphi + G_2 \bar{s}, \quad (3)$$

где  $G_1$  и  $G_2$  – функции влияния. Вынося среднюю по площади круга величину  $\bar{E}$  из-под знака интеграла и приняв, что

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^R G_1 r dr d\varphi = c_1$$

и  $G_2 \bar{s} = c_2 s(r=0)$ , выражение (3) можно записать в виде

$$s(r=0) = (1 - c_2) c_1 \bar{E}. \quad (4)$$

Здесь коэффициенты  $c_1$  и  $c_2$  могут быть определены на основе решения (3). Однако они могут быть найдены и другим путем, например методом наименьших квадратов.

Более простое решение уравнения (1) может быть получено численными методами. Рассмотрим случай квадратной площади  $Q = (2\delta)^2$ , где  $\delta$  – шаг сетки. Если точки  $i = x/\delta$ ,  $j = y/\delta$ , то для точки  $r = 0$  ( $i = j = 0$ ) имеем

$$\Delta s = \frac{1}{\delta^2} (s_{1,0} + s_{-1,0} + s_{0,1} + s_{0,-1} - 4s_0),$$

где  $s_0 = s(r=0) = s_{00}$ . Тогда, приняв, что  $s_{1,0} = a_1 s_{00}$ ,  $s_{-1,0} = a_1 s_{00}$ ,  $s_{0,1} = a_1 s_{00}$  и  $s_{0,-1} = a_1 s_{00}$ , где  $a_1$  – коэффициент, вместо уравнения (1) получим

$$\frac{k_1}{\delta^2} (-4a_1 s_0 + 4s_0) + \sigma s_0 = \bar{E}.$$

Отсюда находим

$$s_0 = \left[ (1 - a_1) + \frac{\sigma \delta^2}{4k_1} \right]^{-1} \frac{\delta^2}{4k_1} \bar{E}. \quad (5)$$

В случае больших величин  $\delta$  и малой  $k_1$  имеем

$$\frac{\sigma \delta^2}{4k_1} \gg (1 - a_1)$$

И тогда

$$s_0 = \bar{E}/\sigma. \quad (6)$$

Так как  $E = \frac{M_i(1-\gamma)}{Qh}$ , где  $M_i = m/T$  – мощность источника;  $M$  – масса выбрасываемых веществ;  $T$  – время, за которое учитываются выбросы ( $T = 3,11 \cdot 10^7$  с, год);  $\gamma$  – % данной примеси, которая превращается в другую сразу в момент выброса ( $\gamma = 5-10$ ), то получаем

$$s_0 = \frac{M_i(1-\gamma) h}{Qh \beta} = \frac{M_i(1-\gamma)}{Q\beta}. \quad (7)$$

В табл. 2 приведены рассчитанные для ряда городов Сибири по соотношению (7) величины  $s_0$  при ситуации застоя воздуха. В дальнейшем эти максимальные величины  $s_0$  будем обозначать как  $s_m$ , т.е. примем, что  $s_m = s_0$ . Там же, т.е. в табл. 2, приведены использованные для расчета величины годовых выбросов по территории городов [6].

Таблица 2

**Выбросы некоторых токсических веществ –  $M$ , тыс. т/год (суммы по площади города), максимальные концентрации веществ при ситуации застоя воздуха –  $s_m$ , мкг/м<sup>3</sup>, в городах Сибири. Концентрации веществ в г. Томске, соответствующие климатическим условиям в январе –  $s_{я}$  и июне –  $s_{и}$ , мкг/кг. Среднесуточные и максимальные разовые предельные концентрации веществ – ПДК<sub>сс</sub> и ПДК<sub>мп</sub>, мкг/кг**

Город, площадь, км <sup>2</sup> , население, тыс. чел.	Величина	Вещество				
		твердое	сернистый газ	двуокись азота	окись углерода	углеводороды
Омск 438; 1166	$M$	90,1	124,6	43,6	112,2	–
	$s_m$	658	910	324	8210	–
Новосибирск 483; 1418	$M$	57,6	45,9	35,0	141,0	–
	$s_m$	384	303	233	930	–
Томск 163; 445	$M$	16,8	4,0	10,5	59,6	0,6
	$s_m$	320	79	206	1140	11,8
Новокузнецк 291; 619	$M$	94,5	53,2	32,3	390,4	0,2
	$s_m$	1030	586	362	12500	0,22
Красноярск 376; 913	$M$	37,2	35,4	25,2	221,7	–
	$s_m$	358	304	216	18900	–
Братск 100; 265	$M$	41,6	15,9	7,6	80,4	0,3
	$s_m$	1270	500	244	2580	9,6
Иркутск 175; 617	$M$	12,5	16,5	10,8	47,7	0,5
	$s_m$	229	303	196	875	8,2
Чита 473; 370	$M$	27,2	24,5	10,5	69,4	0,1
	$s_m$	184	166	70	483	0,7
Томск	$s_{я}$	13,4	3,2	8,3	45	0,47
	$s_{и}$	7,2	1,7	4,5	25	0,25
	ПДК <sub>сс</sub>	150	50	40	3000	3
	ПДК <sub>мп</sub>	500	500	85	5000	12

Рассматривая данные табл. 2, можно отметить, что во всех городах указанные величины близки или превышают предельно допустимые концентрации (как среднесуточные, так и максимальные разовые). Подобное превышение достигает 2 и более раз. Наиболее ярко это проявилось в таком промышленном центре, как Новокузнецк, где превышение ПДК име-

ет место для всех ингредиентов (кроме углеводорода). Отметим, что превышение ПДК по двуокиси азота имеет место во всех городах. Значительные превышения уровней концентраций ПДК наблюдались и по данным непосредственных измерений [7].

В отличие от ситуаций застоя воздуха концентрации веществ, рассчитанные при нормальных кли-

матических условиях, оказались (при тех же величинах выбросов во всех рассматриваемых городах) не большими, порядка 1/10–1/20 ПДК. Такого рода оценки были приведены с помощью соотношения

$$s = M_i(1 - \gamma)/(H\bar{u}d), \quad (8)$$

где  $H$  – высота ВСП;  $\bar{u}$  – средняя скорость ветра в слое;  $d$  – горизонтальная протяженность города. Для примера в табл. 2 приведены концентрации веществ, рассчитанные для условий января ( $H = 600$  м) и июля ( $H = 1100$  м) в г. Томске.

Из табл. 2 следует, что города Сибири при средних (климатических) условиях являются довольно «чистыми».

Таким образом, предложенный метод позволил произвести оценку максимальных уровней загрязнения воздуха при синоптической ситуации застоя воз-

духа. Загрязнения воздуха в городах Сибири при ситуации застоя воздуха очень сильные, концентрации загрязняющих веществ близки к предельно допустимым величинам или превышают их.

1. *Климатические* характеристик условий распространения примесей в атмосфере / Под ред. Э.Ю. Безуглой и М.Е. Берлянда. Л.: Гидрометеониздат, 1983. 238 с.
2. Берлянд М.Е., Куренбин О.И. // Труды ГГО. 1969. Вып. 233. С. 319.
3. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1985. 272 с.
4. Белов П.Н., Комаров В.С. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 2. С. 195–203.
5. Гандин Л.С., Дубов А.С. Численные методы краткосрочного прогноза погоды. 1968. 427 с.
6. *Ежегодник* состояния загрязнения атмосферы в городах на территории России / Под ред. Э.Ю. Безуглой. СПб., 1993. 407 с.
7. Безуглая Э.Ю., Расторгуева Т.П., Смирнова И.В. Чем дышит промышленный город. Л.: Гидрометеониздат, 1991. 225 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск  
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию  
28 апреля 1998 г.

*P.N. Belov, V.S. Komarov. Maximum Contamination Levels in Towns Under Synoptical Stagnation of Air.*

The maximum contamination levels in towns under synoptical stagnation of the air take place at weak winds and ground temperature inversion a theoretical way for toxins concentration determination under such conditions is described. The examples of maximum concentrations calculation of the toxins in a series of Siberian towns are presented and discussed.