

В.Ф. Рапута, А.П. Садовский, С.Е. Олькин, С.В. Зыков

## Модель оптимизации снижения выбросов примеси в атмосферу города

ИВМиМГ СО РАН, г. Новосибирск  
ГНЦ ВБ «Вектор», пос. Кольцово, Новосибирская обл.

Поступила в редакцию 29.11.2000 г.

Предложена модель оптимального управления выбросами вредных примесей в атмосферу города по среднегодовым показателям загрязнения. В качестве целевой функции используется суммарный ущерб, наносимый здоровью населения в результате загрязнения атмосферы. Основным дополнительным условием в модели оптимизации является ограничение на ресурсы управления снижением мощности источников примеси. Проведено численное моделирование оптимального снижения режимов выбросов пыли-зола от 67 угольных котельных г. Белово Кемеровской области.

### Введение

Существенные возможности рационализации мероприятий по защите атмосферного воздуха в городе связаны с оптимизацией режима выбросов вредных примесей с учетом технологических особенностей источников, размещения застройки, локальных атмосферных циркуляций. Для поиска оптимальных решений необходимо располагать информацией о полях концентрации примесей, создаваемых источниками загрязнения, о затратах на снижение интенсивности выброса для каждого из источников и об ущербе, наносимом загрязнениями окружающей среде. Эффективность управления следует определять по общим экономическим затратам, направленным на уменьшение величины выброса загрязняющих веществ, с учетом санитарно-гигиенических и социальных требований к качеству атмосферы.

### Постановка задачи

Пусть в области  $\Omega$  расположено  $N$  источников с мощностями  $Q_n$ ,  $n = \overline{1, N}$ . Поле приземной концентрации от совокупности источников в силу принципа суперпозиции определяется по следующей формуле:

$$q(x, y, Q) = \sum_{n=1}^N Q_n Y_n(x, y), \quad (1)$$

где  $Y_n(x, y)$  – концентрация от  $n$ -го источника единичной мощности (1 г/с).

Обозначим через  $e_n$  уменьшение мощности  $n$ -го источника;  $0 \leq e_n \leq Q_n$ . Тогда концентрация для измененных мощностей примет вид [1, 2]:

$$q(x, y, Q, e) = \sum_{n=1}^N (Q_n - e_n) Y_n(x, y). \quad (2)$$

Пусть ущерб от загрязнения атмосферы в точке  $(x, y) \in \Omega$  пропорционален среднегодовой концентрации

$$f(x, y) = A(x, y)q(x, y), \quad (3)$$

где  $A$  – удельный ущерб здоровью населения в рассматриваемой точке.

Далее предположим, что

$$A(x, y) = Cp(x, y), \quad (4)$$

где  $p(x, y)$  – плотность населения;  $C$  – удельный ущерб здоровью от загрязнения единицы площади с заданной плотностью населения. Тогда суммарный ущерб, наносимый здоровью, в области  $\sigma$

$$F(e) = \int_{\sigma} Cp(x, y)q(x, y, e) dx dy. \quad (5)$$

Принимая в качестве целевой функции выражение (5), в результате приходим к задаче минимизации ущерба здоровью населения от загрязнения атмосферы

$$F(e) \rightarrow \min_{e \in E} \quad (6)$$

при следующем ограничении на ресурсы управления:

$$G(e) \leq G_0, \quad (7)$$

где

$$G(e) = \sum_{n=1}^N G_n(e_n); \quad (8)$$

$G_n(e_n)$  – стоимость снижения выброса от  $n$ -го источника;  $G_0$  – общее количество средств, выделяемых на снижение выбросов;  $E = \{e: 0 \leq a_n \leq e_n \leq Q_n, n = \overline{1, N}\}$  – область про-

стейших ограничений,  $a_n$  – допустимое снижение выброса для  $n$ -го источника.

**Замечание 1.** Пусть функция стоимости имеет вид

$$G_n(e_n) = ke_n.$$

В этом случае задача (6)–(8) с учетом (2) является задачей линейного программирования и ее решение может быть найдено стандартными методами.

**Замечание 2.** Если включить в рассмотрение в качестве искомого параметров также и положение источников, то задача (6)–(8) может быть сведена к решению задачи нелинейного программирования. Подобная задача исследуется в работе [3].

**Замечание 3.** В качестве дополнительных условий в задачу (6)–(8) могут быть введены и ограничения на ПДК. В этом случае задача оптимизации выбросов может оказаться неразрешимой.

### Модели расчета среднегодовой концентрации загрязняющей примеси

Одним из принципиальных моментов в построении моделей оптимизации выбросов является выбор модели расчета среднегодовых концентраций загрязняющих веществ. Для расчета среднегодовых концентраций используются соответствующими совместными распределениями скорости, направления ветра и характера устойчивости пограничного слоя атмосферы, после чего все результаты суммируются с учетом повторяемости гидрометеорологических ситуаций.

Расчетная формула наземной среднегодовой концентрации, основанная на методике МАГАТЭ [4, 5], для одиночного источника имеет вид

$$q(x, y) = \frac{Q}{2\pi} \sum_i R_i \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_{yi}^2}\right] \times \left[ \exp\left[-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_{zi}^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_{zi}^2}\right] \right] / (U_i \sigma_{yi} \sigma_{zi}), \quad (9)$$

где  $Q$  – интенсивность источника;  $h$  – его высота;  $\sigma_{yi}$ ,  $\sigma_{zi}$  – дисперсии факела в горизонтальном и вертикальном направлениях;  $U_i$  – скорость ветра на высоте источника;  $R_i$  – функция распределения повторяемости гидрометеорологической ситуации для  $i$ -го факела, определяемая по климатическим данным.

Расчеты по модели (9) для г. Кемерово приведены в [6]. Для ряда примесей показано вполне удовлетворительное согласие вычисленных и измеренных на стационарных постах концентраций.

При недостаточно полной гидрометеорологической информации в первую очередь следует учитывать розу ветров [7]. В этом случае можно воспользоваться методикой Главной геофизической обсерватории (ГГО) [8,9]. Она позволяет проводить расчеты разовой концентрации при весьма ограниченных требованиях к входной информации.

Входными метеопараметрами модели ГГО являются направление и скорость ветра на уровне флюгера, температура воздуха.

Повторяемость гидрометеорологической ситуации в данном случае определяется среднегодовой розой ветров и средней для года температурой воздуха.

### Численное моделирование оптимальных режимов выброса

Рассмотрим примеры численного решения задач оптимизации распределения ресурсов на снижение выбросов пыли-зола от котельных центральной части г. Белово. Цель расчетов – продемонстрировать возможность применения предлагаемых моделей управления к конкретным источникам загрязнения атмосферы города и обеспечения их доступной входной информацией. Подготовительным этапом решения задач оптимизации является расчет полей среднегодовых концентраций пыли-зола. Исходя из наличия входных данных, была использована модель ГГО. В число источников, подлежащих регулированию, было внесено 67 котельных центральной части г. Белово Кемеровской области. Данные о параметрах источников: их высоте, диаметре труб, мощности, температуре и объеме выходящей газовой смеси, степени очистки – взяты из [10].

Стоимость снижения выброса  $n$ -го источника полагалась пропорциональной величине уменьшения выброса  $e_n$  с постоянным коэффициентом пропорциональности  $k$  для всех источников. В этом случае суммарная функция стоимости регулирования ущерба принимает следующий вид:

$$G(\mathbf{e}) = k \sum_{n=1}^{67} e_n. \quad (10)$$

Удельные ущербы от выбросов пыли-зола котельных центральной части г. Белово

Высота трубы, м	5	10	15	30	45
Удельный ущерб	14,5	9,9	7,7	3,6	1,9

В численных экспериментах суммарное снижение выброса пыли-зола полагалось равным 300 г/с, т.е. в данном случае ресурс управления

$$G_0 = 300k. \quad (11)$$

Конкретное задание коэффициента  $k$  в данной постановке не обязательно, поскольку соотношения (10), (11) позволяют исключить его из ограничения (7).

Относительное снижение мощности источников варьировалось от 0 до 50%. Плотность населения в частной и городской застройке полагалась 1:10.

На рис. 1 приведены исходные среднегодовые концентрации пыли-зола, создаваемые котельными г. Белово. На рис. 2 представлены результаты моделирования поля приземной концентрации после оптимального снижения выбросов. Для линейной функции стоимости (10) величина удельного ущерба, наносимого выбросом (1 г/с) отдельной котельной, является представительной характеристикой и в значительной степени определяется высотой источника. В таблице представлена зависимость удельного ущерба от высоты труб котельных, расположенных в центральной части г. Белово. Данные таблицы показывают существенную дифференциацию ущерба от высоты труб.

