УДК 332.1: 519.63

Семенчин Евгений Андреевич, доктор физ.-мат. наук, профессор,
Кузякина Марина Викторовна

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОГО УЩЕРБА, ПРИЧИНЯЕМОГО ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ ВЫБРОСАМИ ЛЕГКОЙ ПРИМЕСИ ОТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В статье предлагается методика оценки экономического ущерба, причиняемого воздушной среде выбросами легкой примеси от промышленных предприятий, оценки прогнозируемой величины предотвращенного ущерба и размеров платежей за выбросы в атмосферу примесей от стационарных источников.

Для расчета экономического ущерба [1, С.102], причиняемого воздушной среде годовыми выбросами загрязнений в атмосферу от отдельных стационарных источников, к которым, в частности, относятся промышленные предприятия, используется формула:

$$y = \sigma \cdot f \cdot \sum_{i=1}^{n} \gamma_i a_i m_i \,, \qquad (1)$$

где m_i - фактический объем выброса i -го вредного вещества, $i = 1,...,n$, σ - коэффициент, учитывающий региональные особенности территории, подверженной вредному воздействию, и связанный с относительной опасностью ее загрязнения, a_i - коэффициент приведения различных вредных веществ к агрегированному виду , характеризующий относительную опасность i -го вещества, f - коэффициент, учитывающий характер рассеяния веществ в атмосфере, γ_i - стоимостная (денежная) оценка ущерба от единицы выброса i -го вредного вещества (коэффициент

γ_i часто расщепляют на сумму $\gamma = \gamma' + \gamma''$, где γ', γ'' - стоимостные оценки ущерба, причиняемого соответственно выбросами, не превышающими их предельных значений и выбросами, превышающими предельные значения i-го вещества), n - количество вредных веществ.

В работе [2, С.79] предлагается уточненная формула расчета экономического ущерба:

$$y = \begin{cases} \sigma \cdot f \cdot \sum\limits_{i=1}^{n} \gamma_i' k_i a_i m_i, \quad m_i \le ПДВ_i, \\ \sigma \cdot f \cdot \sum\limits_{i=1}^{n} \gamma_i' k_i a_i ПДВ_i + \cdot \sigma \cdot f \cdot \sum\limits_{i=1}^{n} \gamma_i'' k_i a_i (m_i - ПДВ_i), \quad m_i > ПДВ_i, \end{cases} \tag{2}$$

здесь k_i - коэффициент, учитывающий инфляцию, $i = 1,...,n$, обратим внимание, что значения γ_i', γ_i'' существенно зависят от i, $i = 1,...,n$(в настоящее время существуют подробные таблицы значений γ_i', γ_i'').

Для легкой примеси f рассчитывают по формуле [1, С.105]:

$$f = \frac{100}{100 \cdot \varphi H} \cdot \frac{4}{1+U}, \quad \varphi = 1 + \frac{\Delta T}{75^o C}, \tag{3}$$

где φ - поправка на тепловой подъем факела в атмосфере, ΔT - среднегодовая разность температур в устье источника (трубы) и в окружающей атмосфере, H - высота источника (трубы), U - среднегодовое значение модуля скорости ветра.

Для оценки прогнозируемой величины предотвращенного ущерба используется формула [3, С.6], в которой для территории в целом в качестве оцениваемой группы источников могут рассматриваться все источники, рассматриваемые как единый "приведенный" источник:

$$Y_{npr} = Y_{y\partial r} \cdot (M_1 - M_2) \cdot K_э \cdot J_\partial, \tag{4}$$

где Y_{npr} - эколого-экономическая оценка величины предотвращенного ущерба водным ресурсам в рассматриваемом r-том регионе (далее -

предотвращенный ущерб), $Y_{yдr}$ - эколого-экономическая оценка удельного ущерба от выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух (далее - показатель удельного ущерба) для r-го экономического района РФ, M_1, M_2 - приведенная масса выбросов загрязняющих веществ соответственно на начало и конец расчетного периода в рассматриваемом регионе, $K_э$ - коэффициент экологической ситуации и экологической значимости состояния атмосферного воздуха территорий экономических районов России, $J_д$ - индекс - дефлятор по отраслям промышленности, устанавливаемый Минэкономики России на рассматриваемый период и доводимый Госкомэкологией России до территориальных природоохранных органов.

Показатель удельного ущерба $Y_{yдr}$ рассчитывается по формуле [4, С.107]:

$$Y_{yдr} = \frac{\sum_{i=1}^{N} y_i}{M_r}, \tag{5}$$

где y_i - экономическая оценка нанесенного ущерба i-ым загрязняющим веществом атмосферному воздуху в r-том регионе, $i = 1,...,n$, M_r - приведенная масса фактических выбросов загрязняющих веществ за отчетный период времени в r-том регионе. Здесь

$$M_r = \sum_{k=1}^{K} M_k\ ,\ M_k = \sum_{i=1}^{n} m_i \cdot K_{эi}\ , \tag{6}$$

k - номер конкретного объекта или направления атмосфероохранной деятельности в регионе, $K_{эi}$ - коэффициент относительной эколого-экономической опасности i-го загрязняющего вещества или группы веществ.

Платежи за загрязнение окружающей среды [1, С.105] представляют собой особый вид косвенного налогообложения, но не являются компенсацией за наносимый экологический ущерб. Размеры платежей за выброс от стационарных источников определяется по следующей формуле:

$$S = \begin{cases} \sigma\sum\limits_{i=1}^{n} m_i n_i, \quad \text{если} \quad m_i \le q_i, \\ \sigma\left[\sum\limits_{i=1}^{n} q_i n_i + \sum\limits_{i=1}^{n}(m_i - q_i)n_i'\right], \quad \text{если} \quad q_i < m_i \le l_i, \\ \sigma\left[\sum\limits_{i=1}^{n} q_i n_i + \sum\limits_{i=1}^{n}(l_i - q_i)n_i' + 5\sum\limits_{i=1}^{n}(m_i - l_i)n_i'\right], \quad \text{если} \quad m_i > l_i, \end{cases} \qquad (7)$$

где q_i, l_i, n_i, n_i' - соответственно предельно допустимый норматив выброса (ПДВ), временно-согласованный норматив выброса (ВСВ), базовая ставка платы за выбросы в пределах ПДВ, базовая ставка платы за выбросы в пределах ВСВ i-го вредного вещества.

На предприятиях в большинстве случаев отсутствует учет фактических объемов выброса. Поэтому для определения m_i (фактического объема выброса i-го вредного вещества) необходимо решить задачу, обратную задаче нахождения концентрации примеси в турбулентной диффузии, формулировка и решение которой приводятся ниже.

Математическая модель рассеяния примеси в турбулентной атмосфере [4, С.16] i-й примеси представляет собой полуэмпирическое уравнение

$$\begin{aligned} &\frac{\partial q_i}{\partial t} + U^{(i)}\frac{\partial q_i}{\partial x} - w^{(i)}\frac{\partial q_i}{\partial z} + \alpha^{(i)} q_i = \\ &= \frac{\partial}{\partial x}K_x^{(i)}\frac{\partial q_i}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}K_y^{(i)}\frac{\partial q_i}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}K_z^{(i)}\frac{\partial q_i}{\partial z} + f_i \end{aligned} \qquad (8)$$

$q_i = q_i(t, x, y, z)$, $t \in [t_0, T]$, с заданными для его решения начальным

$$q_i(t_0, x, y, z) = \varphi_i(x, y, z) \tag{9}$$

и граничными

$$\left\{ K_z^{(i)} \frac{\partial q_i}{\partial z} + w^{(i)} q_i \right\}\Big|_{z=z_0} = V_s^{(i)} q\Big|_{z=z_0}, \tag{10}$$

$$q_i(t, x, y, z) \to 0 \text{ при } x^2 + y^2 + z^2 \to \infty,\ z \to z_0 \tag{11}$$

условиями [4, С 38.], $i = 1,...,n.$

Будем считать, что фоновая концентрация $\varphi(x, y, z)$ в (8)-(11) не учитывается, т.е. $\varphi_i(x, y, z) \equiv 0$, $i = 1,...,n,$ начальный момент времени $t_0 = 0$.

В задаче, обратной поставленной (8)-(11), требуется по заданным в уравнении (8) коэффициентам $U^{(i)}$, $w^{(i)}$, $\alpha^{(i)}$, $K_x^{(i)}$, $K_y^{(i)}$, $K_z^{(i)}$, функции $q_i(t, x, y, z)$, удовлетворяющей начальному и граничным условиям (9-11), найти (восстановить) функцию источника f_i. Из (8) следует, что

$$f_i(t, x, y, z) = \frac{\partial q_i}{\partial t} + U^{(i)} \frac{\partial q_i}{\partial x} - w^{(i)} \frac{\partial q_i}{\partial z} + \alpha^{(i)} q_i -$$

$$- \frac{\partial}{\partial x} K_x^{(i)} \frac{\partial q_i}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} K_y^{(i)} \frac{\partial q_i}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} K_z^{(i)} \frac{\partial q_i}{\partial z}. \tag{12}$$

Можно убедиться, что если в (8) f_i заменить на m_i, то решение задачи (8-11) не изменится:

$$m_i = \frac{\partial q}{\partial t} + U \frac{\partial q}{\partial x} - w \frac{\partial q}{\partial z} + \alpha q - \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial q}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial q}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial q}{\partial z}. \tag{13}$$

Согласно (13) для вычисления значений m_i требуется предварительно вычислить значения производных функции $q_i(t, x, y, z)$ по t, x, y, z (по x, y, z - до второго порядка включительно).

Задача нахождения производной n-го порядка $z(t)$ функции $u(t)$, т.е. $z(t) = u^{(n)}(t)$, сводится к решению (относительно $z(t)$) следующего интегрального уравнения первого рода [5, С.19]:

$$\int_0^t \frac{1}{(n-1)!}(t-\tau)^{n-1} z(\tau) d\tau = u(t). \qquad (14)$$

После замен, вытекающих из (14),

$$\frac{\partial q_i}{\partial t} = \int_0^t q_i(\tau) d\tau, \quad \frac{\partial q_i}{\partial x} = \int_0^x q_i(\tau) d\tau,$$

$$\frac{\partial q_i}{\partial z} = \int_0^z q_i(\tau) d\tau, \quad \frac{\partial^2 q_i}{\partial x^2} = \int_0^x (x-\tau) \cdot q_i(\tau) d\tau, \qquad (15)$$

$$\frac{\partial^2 q_i}{\partial y^2} = \int_0^y (y-\tau) \cdot q_i(\tau) d\tau, \quad \frac{\partial^2 q_i}{\partial z^2} = \int_0^z (z-\tau) \cdot q_i(\tau) d\tau$$

выражение (13) примет вид:

$$m_i = \int_0^t q_i(\tau) d\tau + U^{(i)} \int_0^x q_i(\tau) d\tau - w^{(i)} \int_0^z q_i(\tau) d\tau + \alpha^{(i)} q_i -$$

$$- K_x^{(I)} \int_0^x (x-\tau) \cdot q_i(\tau) d\tau - K_y^{(i)} \int_0^y (y-\tau) \cdot q_i(\tau) d\tau - K_z^{(i)} \int_0^z (z-\tau) \cdot q_i(\tau) d\tau$$

(16)

или

$$\begin{gathered} m_i = \int_0^t q_i(\tau) d\tau + \int_0^x (U^{(i)} \cdot q_i(\tau) - K_x^{(i)} (x-\tau) \cdot q_i(\tau)) d\tau + \\ + \int_0^z (-w^{(i)} \cdot q_i(\tau) - K_z^{(i)} (z-\tau)) d\tau + \alpha^{(i)} q_i + \int_0^y (-K_y^{(i)} (y-\tau) \cdot q_i(\tau)) d\tau. \end{gathered} \qquad (17)$$

Перейдем в (17) от интегралов к их интегральным суммам. Получим приближенное равенство:

$$m_i \approx \sum_{k=1}^{n} q_i(\tau_k) + \sum_{k=1}^{m} (U^{(i)} \cdot q_i(x_k) - K_x^{(i)}(x - x_k) \cdot q_i(x_k)) +$$
$$+ \sum_{k=1}^{p} (-w^{(i)} \cdot q_i(z_k) - K_z^{(i)}(z - z_k)) + \alpha^{(i)} q_i + \sum_{k=1}^{l} (-K_y^{(i)}(y - y_k) \cdot q_i(y_k)). \quad (18)$$

Пусть произведены замеры значений концентрации примеси в моменты времени $t_j,\ j = 1,\ldots,N,$ в точках $(x_j, y_j, z_j),\ j = 1,\ldots,N$. Тогда из (18) следует, что

$$\begin{cases} m_i(t_1) = F_1, \\ m_i(t_2) = F_2, \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ m_i(t_N) = F_N, \end{cases} \quad (19)$$

где $F_j,\ j = 1,\ldots,N$, – значения правой части (18) в точках (x_j, y_j, z_j), т.е.

$$F_j = \sum_{k=1}^{n} q_i(\tau_k) + \sum_{k=1}^{n} (U^{(i)} \cdot q_i(x_k) - K_x^{(i)}(x_j - x_k) \cdot q_i(x_k)) + \quad (20)$$
$$+ \sum_{k=1}^{n} (-w^{(i)} \cdot q_i(z_k) - K_z^{(i)}(z_j - z_k)) + \alpha^{(i)} q_i + \sum_{k=1}^{n} (-K_y^{(i)}(y_j - y_k) \cdot q_i(y_k)).$$

На практике значения $m_i(t_j),\ j = 1,\ldots,N$, наблюдаются (вычисляются) не точно, а с некоторыми ошибками (помехами), пусть $\nu = (\nu_1, \nu_2, \ldots, \nu_N)^T$ - вектор таких помех, $A = (A_1, A_2, \ldots, A_N)^T$ - произвольный вектор (здесь через T обозначается операция транспонирования). Тогда

$$\begin{cases} A_1 \cdot m_i(t_1) + \nu_1 = F_1, \\ A_2 \cdot m_i(t_2) + \nu_2 = F_2, \\ \qquad \ldots \\ A_N \cdot m_i(t_N) + \nu_N = F_N. \end{cases} \quad (21)$$

Будем предполагать, что $\nu_1 = \tilde{\nu}(t_1)$, $\nu_2 = \tilde{\nu}(t_2)$, …, $\nu_N = \tilde{\nu}(t_N)$, где $\tilde{\nu}(t)$ - белый гауссов шум. Предположим, что математическое ожидание вектора ν равно нулю: $M[\nu] = 0$.

Для подавления влияний значений белого шума $\tilde{\nu}(t)$ на значения $m_i(t)$ используем фильтр Калмана-Бьюси и найдем оценку решения системы (22) [6, С.312]:

$$\hat{m}_i = \phi + PA^T R^{-1}(F - A\phi), \tag{23}$$

где $\hat{m}_i$ - наилучшая в среднем квадратическом смысле апостериорная оценка m_i,

$$\phi = M[m_i],\ P = (N^{-1} + A^T R^{-1} A)^{-1},$$

$$N = M[(m_i - \phi)(m_i - \phi)^T],\ R = M[\nu\nu^T]. \tag{24}$$

Пример 1. В таблице 1 приведены замеры концентрации примеси №1 диоксида азота в атмосфере на территории завода «N».

x	y	z	t	$q(t,x,y,z)$, мг/м3
-19	41,5	2	1	1,21100
17	41	2	2	1,36000
78,9	45,8	2	3	1,42600
93	46	2	4	1,23500
100	47	2	5	1,20000
114	48	2	6	1,17300
123	48	2	7	1,10500

Таблица 1. Значения концентрации примеси диоксида азота в атмосфере на территории завода «N».

Приведенные в таблице 1 значения получены при скорости ветра $U = 3{,}02$ м/с, $w = 0$ (диоксид азота является легкой примесью), $\alpha = 0{,}3$, $K_x = 1$, $K_y = 1$, $K_z = 1$.

Подставляя данные таблицы 1 в (19), получим следующие расчетные значения количества примеси, выбрасываемой источником:

$$m = (5.23452, 5.8782, 6.16332, 5.3382, 5.187, 5.07036, 4.7766)^T \text{ г/с.}$$

Пусть известен вектор помех:

$$\nu = (0.3, 0.5, 0.1, -0.7, 0.25, -0.4, 0.8)^T .$$

Тогда апостериорная оценка m (уточненное решение):

$$\widehat{m} = (5.23302, 5.8767, 6.16182, 5.3367, 5.1855, 5.06886, 4.775)^T \text{ г/с.}$$

Проверим, на сколько точно удалось восстановить мощность источника m. Воспользовавшись известным аналитическим решением краевой задачи с точечным источником непрерывного действия, получим следующие расчетные значения концентрации примеси:

$$\widehat{q} = (1.2112, 1.3602, 1.4262, 1.2352, 1.2002, 1.1732, 1.1052)^T$$

Проведем сравнительный анализ рассчитанных данных с экспериментальными данными.

q, мг/м3	$\widehat{q}$, мг/м3	$\widehat{q} - q$, мг/м3
1,21100	1,2112	0,00017
1,36000	1,3602	0,00019
1,42600	1,4262	0,00020
1,23500	1,2352	0,00017
1,20000	1,2002	0,00016
1,17300	1,1732	0,00016
1,10500	1,1052	0,00015

Таблица 2. показатели рассчитанных, экспериментальных данных и ошибки расчетов.

Данный пример (ровно как и другие примеры) показывает, что используемый метод позволяет получить достаточно близкие к экспериментальным данным значения и может быть использован для решения прикладных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Москаленко А.П., Экономика природопользования и охраны окружающей среды: Учеб. пособие. – М.: МарТ, 2003. – 224 с.
2. Лоскутова Е. О. Оценка эколого-экономического ущерба от загрязнения атмосферы выбросами промышленных предприятий // Известия Российского государственного педагогического университета имени А. И. Герцена. Аспирантские тетради. Москва, 2008. С. 75-82.
3. Данилов-Данильян В.И. Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба. – М.: 1999.
4. Семенчин Е.А. Аналитические решения краевых задач в математической модели атмосферной диффузии. – Ставрополь: Изд-во СКИУУ, 1993.
5. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979.
6. Верлань А.Ф., Сизиков В.С. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы. – Киев: Изд-во «Наукова думка», 1986.

Ф.И.О. Семенчин Евгений Андреевич

место работы Институт экономики, права и гуманитарных специальностей

ученая степень доктор физико-математических наук

ученое звание профессор

направление исследований 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ; 08.00.13 – Математические и инструментальные методы экономики

адрес электронной почты es14@mail.ru

контактный телефон 89094582413

почтовый адрес 350065 г. Краснодар, ул. Невкипелого, 15, кв.66

Ф.И.О. Кузякина Марина Викторовна

место работы Кубанский государственный университет

ученая степень -

ученое звание -

направление исследований 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

адрес электронной почты kuZZyashka@yandex.ru

контактный телефон 89615286469

почтовый адрес 350001, г.Краснодар, ул.Ковтюха, 30