

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЙ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ВБЛИЗИ СТАЦИОНАРНОГО ПОСТА ВЕРОЯТНОСТНЫМИ МЕТОДАМИ

Гаврась О.В., Заноз А.В.,

Научный руководитель кандидат техн. наук Гавриленко Т.В.

*Сибирский федеральный университет*

Одним из основных загрязнителей воздуха в городах является автомобильный транспорт. Вероятностный подход в экологических исследованиях позволяет учесть случайный характер погодных условий и интенсивности транспортного потока, выделить наиболее опасные факторы, получить количественную оценку показателя безопасности автомагистралей.

Состояние атмосферного воздуха принято оценивать интегральным показателем – индексом загрязнения атмосферы, рассчитываемым по пяти наиболее значимым ингредиентам:

$$\text{ИЗА}_5 = \sum_{i=1}^5 q_i, \quad (1)$$

где  $q_i = Q_i / Q_{\text{ПДК},i}$ ,  $Q_i$  – концентрация  $i$ -го вещества,  $Q_{\text{ПДК},i}$  – его предельно допустимая концентрация.

Расчеты концентраций вредных веществ по методике [1] в районе стационарного поста Государственной службы наблюдений в г. Красноярске, расположенного на ул. Сурикова, показали, что наибольший вклад в загрязнение воздуха автотранспортом вносят следующие вещества: диоксид азота, оксид углерода, углеводород, формальдегид и двуокись серы [2]. Таким образом, можно ввести показатель загрязнения атмосферы автотранспортом  $\text{ИЗА}_5$ , включающий вышеперечисленные вещества. Загрязнение воздушной среды считается малоопасным, если  $\text{ИЗА}_5 \leq 5$ .

Обозначим  $X = \text{ИЗА}_5 / 5$ . Тогда условие малоопасного состояния воздушной среды вблизи автомагистралей

$$X \leq 1. \quad (2)$$

Объем выбросов вредных веществ определяется на основе учёта различных типов транспортных средств, интенсивности движения и конкретных дорожных условий. Выброс  $i$ -го загрязняющего вещества, г/(м·с), движущимся автотранспортным потоком определяется по формуле:

$$M_i^{\text{П}} = \frac{1}{3600} \sum_{k=1}^K M_{k,i}^{\text{П}} \cdot G_k \cdot k_{V_{k,i}} \quad (3)$$

где  $M_{k,i}^{\text{П}}$  – пробеговый выброс  $i$ -го вредного вещества автомобилями  $k$ -й группы для городских условий эксплуатации, г/км;  $K$  – количество групп автомобилей;  $G_k$ , авт./час, – фактическая наибольшая интенсивность движения, т.е. количество автомобилей каждой из  $K$  групп, проходящих через фиксированное сечение выбранного участка автомагистрали в единицу времени в обоих направлениях по всем полосам движения;  $k_{V_{k,i}}$  – поправочный коэффициент, учитывающий среднюю скорость движения транспортного потока  $V_{k,i}$ , км/час, на выбранной автомагистрали (или ее участке);  $1/3600$  – коэффициент перехода от часа к секундам [1].

Концентрация  $i$ -го вещества в воздухе определяется по зависимости

$$Q_i = \frac{2M_i^{\text{П}}}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot V \cdot \sin \varphi} + F, \quad (4)$$

где  $M_i^{\Pi}$  – мощность эмиссии, г/(м·с);  $\sigma$  – стандартное отклонение Гауссова рассеивания, зависящее от расстояния от оси дороги и уровня солнечной радиации, м;  $V$  – скорость ветра, м/с;  $\varphi$  – угол между направлением ветра и осью трассы (при  $\varphi < 30^\circ$ ,  $\sin \varphi = 0,5$ );  $F$  – фоновая концентрация загрязнения воздуха, г/м<sup>3</sup> [3].

В формуле (4) учитываются два уровня солнечной радиации. Пусть  $R_1$  и  $R_2$  – события, заключающиеся в наступлении дней с сильной и слабой солнечной радиацией соответственно. Сильная солнечная радиация наблюдается в светлое время суток при солнечной ясной погоде. Тогда вероятность погоды с сильной радиацией можно оценить, как

$$P(R_1) = \frac{\tau_c}{\tau_{\max}}, \quad (5)$$

где  $\tau_c$ ,  $\tau_{\max}$  – средняя и максимально возможная продолжительность солнечного сияния соответственно, ч. В качестве  $\tau_c$  принимается среднее количество солнечных часов с ясной солнечной погодой в году, в качестве  $\tau_{\max}$  – суммарная продолжительность светлого периода суток в течение года.

Вероятность погоды со слабой солнечной радиацией определяется по зависимости

$$P(R_2) = 1 - P(R_1). \quad (6)$$

При оценке этих вероятностей используются климатические характеристики из [4], и приведенные в табл. 1.

Таблица 1

**Продолжительность солнечного сияния, ч**

Зима		Весна		Лето		Осень	
$\tau_c$	$\tau_{\max}$	$\tau_c$	$\tau_{\max}$	$\tau_c$	$\tau_{\max}$	$\tau_c$	$\tau_{\max}$
181	724	588	1295	765	1519	299	793

Тогда вероятности  $P(R_1)$  составят 0,25; 0,454; 0,504 и 0,377 для зимы, весны, осени и лета соответственно. Вероятности  $P(R_2)$  принимают значения 0,75; 0,546; 0,496 и 0,623 для зимы, весны, осени и лета соответственно.

Оценка безопасного состояния воздушного пространства может быть проведена по формуле

$$P(X \leq 1) = \sum_{k=1}^2 P(X \leq 1 | R_k) \cdot P(R_k), \quad (7)$$

где  $P(X \leq 1)$  – вероятность выполнения условия (2);  $P(R_k)$  – вероятность наступления события  $R_k$ ;  $P(X \leq 1 | R_k)$  – условная вероятность того, что будет иметь место безопасное состояние воздушной среды при соответствующей солнечной радиации  $R_k$ .

Условные вероятности  $P(X \leq 1 | R_k)$  могут быть определены методом Монте-Карло. В качестве случайных параметров на «входе» принимается интенсивность движения автотранспорта и скорость ветра, а на «выходе» – концентрации вредных веществ, входящих в ИЗА<sub>5</sub>. Предполагаем, что случайная величина изменения интенсивности движения автомобильного транспорта подчиняется нормальному закону распределения. Тогда ее моделирование можно провести с помощью пары независимых стандартных нормальных (т.е. гауссовских с нулевым средним и единичной дисперсией) случайных величин  $\xi$  и  $\eta$ , определяемых по формулам:

$$\xi = (-\ln \alpha_1)^{-1/2} \cos(2\pi\alpha_2), \quad (8)$$

$$\eta = (-\ln \alpha_1)^{-1/2} \sin(2\pi\alpha_2), \quad (9)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – случайные равномерно распределенные величины из интервала от 0 до 1, генерируемые датчиком псевдослучайных чисел [5]. В этом случае приближенная модель случайного процесса может быть представлена как:

$$w_j = \begin{cases} \xi, & \text{при } j = 2k, \\ \eta, & \text{при } j = 2k + 1, \end{cases} \quad k=0; 0,5; 1; 1,5; \dots \quad (10)$$

Выборка чередующихся значений  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  создается с помощью датчика псевдослучайных чисел, встроенного в Excel. Датчик генерирует значения случайной величины, распределённой по равномерному закону, из интервала [0,1]. Тогда модельная выборка значений интенсивности будет состоять из членов ряда:

$$N_j = w_j \cdot \sigma + \bar{N}, \quad (11)$$

где  $\bar{N}$  – среднесуточная интенсивность движения, определяемая из натуральных наблюдений,  $\sigma = \bar{N} \cdot c_v$ ,  $c_v$  – коэффициент вариации. Наблюдения за интенсивностью движения автотранспорта в районе поста показали, что  $\bar{N}$  составляет 24500 авт./сут, коэффициент вариации – 12%.

Обработка данных по скорости ветра для многих метеостанций показывает, что наилучшее согласие со статистическими данными имеет несмещённое распределение Вейбулла [6]:

$$F(V) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{V}{\beta} \right)^\alpha \right], \quad (12)$$

где  $F(V)$  – вероятность того, что в наперёд заданный момент времени скорость ветра не превысит значения  $V$ ;  $\alpha > 0$ ,  $\beta > 0$  – коэффициенты, определяемые для каждой метеостанции, и зависящие от ветрового режима данной местности.

Плотность распределения выражается зависимостью

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} x^{\alpha-1} \cdot \exp \left[ - \left( \frac{x}{\beta} \right)^\alpha \right]. \quad (13)$$

Оценки параметров  $\alpha$  и  $\beta$  могут быть найдены по методу максимального правдоподобия. Если ввести обозначения  $c = \beta^{-\alpha}$ ,  $b = \alpha$ , то данные параметры определяются из решения системы уравнений

$$\begin{cases} c = \frac{n}{\sum_{k=1}^n x_k^b}, \\ \frac{n}{b} + \sum_{k=1}^n \ln x_k - \frac{n \sum_{k=1}^n x_k^b \ln x_k}{\sum_{k=1}^n x_k^b} = 0, \end{cases} \quad (14)$$

где  $x_k$  – статистические данные наблюдений за ветром,  $k = 1, 2, \dots, n$ ;  $n$  – длина выборки. Второе уравнение системы (14) является нелинейным, которое решается методом деления отрезка пополам.

Нами были обработаны данные о скорости ветра, фиксировавшиеся с 1 июня 2012 г. по 28 февраля 2013 г. в 13 и 19 часов. Данные поступают с метеостанции, установленной в Центральном районе г. Красноярска в реальном времени [7]. В итоге были получены значения параметров для трех сезонов, приведенные в табл. 2.

Моделирование случайной величины, подчиняющейся закону распределения Вейбулла, выполняется методом обратной функции распределения. В этом случае

$$V = F^{-1}(z),$$

где  $z$  – случайная величина, равномерно распределенная на интервале  $[0,1]$ , обратная функция к функции распределения Вейбулла (12). Обращая ее, получим выражение для выборки

$$V_j = \beta(-\ln(1-z_j))^{1/\alpha}, \quad j=1, 2, \dots \quad (15)$$

По методу Монте-Карло строятся выборки значений концентраций для пяти исследуемых веществ:  $Q_{1,j}, Q_{2,j}, Q_{3,j}, Q_{4,j}, Q_{5,j}$  и совокупная выборка

$$X_j = \frac{1}{5} \left( \frac{Q_{1,j}}{Q_{ПДК,1}} + \frac{Q_{2,j}}{Q_{ПДК,2}} + \frac{Q_{3,j}}{Q_{ПДК,3}} + \frac{Q_{4,j}}{Q_{ПДК,4}} + \frac{Q_{5,j}}{Q_{ПДК,5}} \right). \quad (16)$$

Таблица 2

**Значения параметров закона распределения для скорости ветра**

Сезон	$\alpha$	$\beta$
Лето	1,928	1,926
Осень	1,398	1,892
Зима	1,296	1,850

В том случае, когда случайная величина  $X$  подчиняется нормальному закону распределения, условные вероятности находятся с помощью функции Лапласа

$$P(X \leq 1 | R_k) = 0,5 + \Phi \left( \frac{1 - \bar{X}_k}{\sqrt{\hat{X}_k^2}} \right), \quad (17)$$

где  $\Phi(\cdot)$  – табулированная функция Лапласа,  $\bar{X}_k$  - среднее значение случайной величины  $X$  при выполнении условия  $R_k$ ,  $\hat{X}_k$  - стандартное отклонение случайной величины  $X$  при выполнении условия  $R_k$ .

**Список литературы**

1. Методика определения выбросов автотранспорта для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы городов / Государственный комитет Российской Федерации по охране окружающей среды: М., 1999. 8 с.
2. Гаврась, О.В. Анализ загрязнения воздуха транспортными потоками на застроенной территории /О.В. Гаврась, А.В. Заноз, Т.В. Гавриленко // Материалы VIII Всероссийской научно-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 155-летию со дня рождения К.Э.Циолковского: Молодежь и наука [Электронный ресурс]. - Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012.
3. Рекомендации по учету требований по охране окружающей среды при проектировании автомобильных дорог и мостовых переходов / Мин-во транспорта Российской Федерации. – М., 1995. – 74 с.
4. Климат Красноярска / под ред. Швер Ц.А. и Герасимовой А.С. – Л.: Гидрометеоиздат, 1982. – 231 с.
5. Пригарин С.М. Методы численного моделирования случайных процессов и полей / Отв. Ред. Г.А.Михайлов. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2005. – 259 с.
6. Райзер В.Д. Методы теории надёжности в задачах нормирования расчётных параметров строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1986. – 192 с.
7. Графики фактического хода метеоэлементов по ст. Красноярск [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://meteo.krasnoyarsk.ru/map\\_p/fr2.htm?mode=2](http://meteo.krasnoyarsk.ru/map_p/fr2.htm?mode=2). – Загл. с экрана.