

УДК 519.2:536.24

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПЕРЕНОСА ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ОТ АВТОМОБИЛЬНОГО ПОТОКА СО СЛУЧАЙНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

М. Г. Бояршинов

Пермский государственный технический университет, 614600 Пермь

Рассматривается приближенная модель переноса и рассеяния автомобильных выбросов поперечным потоком воздуха в предположении, что движение автотранспорта описывается случайным пуассоновским процессом. Излагается один из возможных подходов к оценке концентрации переносимой ветром примеси и определению ее статистических характеристик. Определяется длина представительного участка автомобильной трассы, достаточного для корректного анализа экологической ситуации. Оценивается мощность линейного стационарного источника, аппроксимирующего распределение математического ожидания концентрации примесей, выбрасываемых случайным потоком автомобилей.

Решение задачи об оценке загрязнения атмосферы вблизи автомобильных трасс осложняется тем, что появление очередного автомобиля на дороге обусловлено многими случайными факторами. Дополнительные трудности имеют место в связи с нестационарностью процесса переноса и рассеяния движущимся атмосферным воздухом примесей, выбрасываемых случайным потоком автомобилей.

Оценка вклада максимальных выбросов автотранспорта в общий уровень загрязнения атмосферы современного города приведена в [1]. Влияние автотранспортного загрязнения на растительные насаждения, прилегающие к автотрассам с интенсивным автомобильным движением, рассматривается в [2]. В [3] разработана модель, позволяющая исследовать зависимость концентрации загрязняющих веществ, степени и размеров зоны поражения от интенсивности движения автотранспорта, состава транспортного потока, параметров автодороги и метеорологических факторов.

Для оценки концентрации примесей от потока автомобилей наиболее часто используются модели прямолинейных стационарных источников. Модель [4] применима, если протяженность рассматриваемого участка дороги многократно превышает расстояние от контрольной точки, в связи с чем, как отмечается в [5], завышается концентрация при невыполнении указанного условия. Модель [6] используется для источников конечной длины и применима, если направление ветра перпендикулярно дороге. Направление ветра учитывается в модели [7] прямолинейного источника примеси конечной длины.

В [8] оценены содержания примесей CO , NO_x и твердых частиц в выхлопных газах машин различных типов. В [9] для моделирования переноса загрязняющих веществ вблизи автотрасс используется аэродинамическая труба. Результаты измерений сравниваются с расчетными; отмечается, что различие имеет место вследствие неточного описания формы зданий в теоретической модели. С использованием двух- и трехмерных математических моделей в [10] рассчитываются скорости воздушных потоков и концентрации загрязняющих веществ от автотранспорта вдоль городских автомобильных трасс. В [11] для моделирования переноса в атмосфере загрязняющих веществ от дороги, аппроксимируемой бесконечным источником, используется метод конечных элементов.

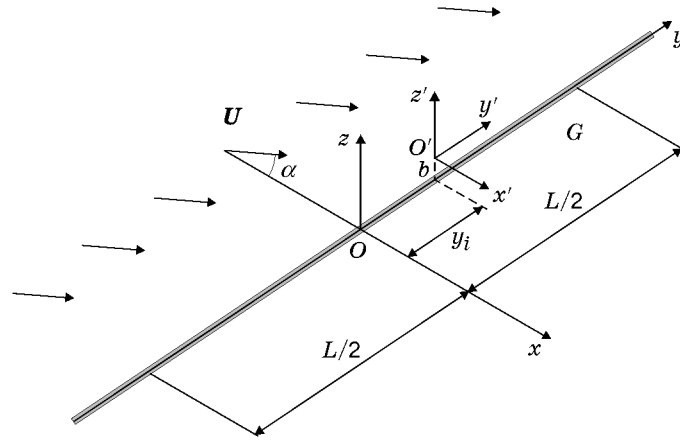


Рис. 1. Схема задачи о движении потока автомобилей

В настоящей работе рассматривается один из возможных подходов к оценке поля концентрации примесей вблизи автотрассы, использующий приближенное решение задачи о переносе автомобильных выбросов атмосферными потоками. Пусть в пространственной области G расположен протяженный (в направлении оси Oy) участок односторонней однопольной дороги длиной L (рис. 1). Принято, что скорость движения всех автомобилей по автотрассе одинакова, постоянна и равна V . Трасса обдувается горизонтальным потоком воздуха с постоянной скоростью U , направленным под углом α к оси Ox . Предполагается, что скорость воздушного потока во всех точках области G не зависит от расположения, скорости и характеристик автомобилей. Концентрация загрязняющих веществ вблизи автомобильной трассы зависит от объема примесей, выбрасываемых всеми автомобилями, которые одновременно находятся на рассматриваемом участке и являются подвижными точечными источниками загрязнения с постоянной интенсивностью q . Принято, что появление автомобиля в начале рассматриваемого участка трассы представляет собой случайный пуассоновский поток событий с постоянной интенсивностью λ .

Требуется определить распределение в области G концентраций примесей, выбрасываемых автомобильным транспортом; конечную длину L участка автомобильной трассы (характерный размер), достаточную для нахождения концентрации примесей в контрольной точке; оценить справедливость замены трехмерной задачи двумерной схемой распространения примесей от прямолинейного стационарного источника.

В рассматриваемой задаче речь идет о нестационарном распространении примесей от подвижных источников. Использование подвижной системы координат $O'x'y'z'$, связанной с движущимся с постоянной скоростью автомобилем, позволяет перейти к задаче, описываемой стационарным уравнением [12] диффузии примеси от точечного источника, расположенного в точке с координатами $x' = 0, y' = 0, z' = 0$ (рис. 1):

$$U'_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} + U'_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} + U'_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + q\delta(x', y', z'), \quad (1)$$

где φ — концентрация примесей; δ — дельта-функция Дирака; K_x, K_y, K_z — коэффициенты турбулентной диффузии. Относительная скорость воздушного потока в подвижной системе координат имеет компоненты

$$U'_x = U \cos \alpha, \quad U'_y = U \sin \alpha - V, \quad U'_z = W. \quad (2)$$

В предположении, что скорость ветра не зависит от высоты и коэффициенты K_x , K_y , K_z постоянны, решение уравнения (1) имеет вид [12]

$$\varphi(x', y', z') = q \exp \left(\frac{U'_x x'}{2K_x} + \frac{U'_y y'}{2K_y} + \frac{U'_z z'}{2K_z} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{x'^2}{K_x} + \frac{y'^2}{K_y} + \frac{z'^2}{K_z}} \sqrt{\frac{U'^2_x}{K_x} + \frac{U'^2_y}{K_y} + \frac{U'^2_z}{K_z}} \right) / \left(4\pi \sqrt{K_x K_y K_z} \sqrt{\frac{x'^2}{K_x} + \frac{y'^2}{K_y} + \frac{z'^2}{K_z}} \right). \quad (3)$$

В неподвижной системе координат $Oxyz$ с учетом (2) и зависимостей $x' = x$, $y' = y - y_i$, $z' = z - b$ решение (3) преобразуется к виду

$$\varphi^+(y_i, x, y, z) = q \exp \left(\frac{xU \cos \alpha}{2K_x} + \frac{(U \sin \alpha - V)(y - y_i)}{2K_y} + \frac{W(z - b)}{2K_z} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{x^2}{K_x} + \frac{(y - y_i)^2}{K_y} + \frac{(z - b)^2}{K_z}} \sqrt{\frac{U^2 \cos^2 \alpha}{K_x} + \frac{(U \sin \alpha - V)^2}{K_y} + \frac{W^2}{K_z}} \right) / \left(4\pi \sqrt{K_x K_y K_z} \sqrt{\frac{x^2}{K_x} + \frac{(y - y_i)^2}{K_y} + \frac{(z - b)^2}{K_z}} \right). \quad (4)$$

Здесь y_i — положение подвижного источника в системе координат $Oxyz$. Если учесть, что $y_i = Vt_i - 0,5L$ (t_i — время движения источника с момента появления на трассе), эту концентрацию можно определить как функцию времени

$$\varphi^+(t_i, x, y, z) = q \exp \left(\frac{xU \cos \alpha}{2K_x} + \frac{(U \sin \alpha - V)(y + 0,5L - Vt_i)}{2K_y} + \frac{W(z - b)}{2K_z} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{x^2}{K_x} + \frac{(y + 0,5L - Vt_i)^2}{K_y} + \frac{(z - b)^2}{K_z}} \sqrt{\frac{U^2 \cos^2 \alpha}{K_x} + \frac{(U \sin \alpha - V)^2}{K_y} + \frac{W^2}{K_z}} \right) / \left(4\pi \sqrt{K_x K_y K_z} \sqrt{\frac{x^2}{K_x} + \frac{(y + 0,5L - Vt_i)^2}{K_y} + \frac{(z - b)^2}{K_z}} \right). \quad (5)$$

Для учета условия отсутствия потока примесей сквозь твердую поверхность $\partial\varphi(y_i, x, y, 0)/\partial z = 0$ вводится фиктивный источник, расположенный симметрично исходному относительно горизонтальной плоскости $z = 0$, концентрация примесей от которого определяется выражением

$$\varphi^-(y_i, x, y, z) = q \exp \left(\frac{xU \cos \alpha}{2K_x} + \frac{(U \sin \alpha - V)(y - y_i)}{2K_y} - \frac{W(z + b)}{2K_z} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{x^2}{K_x} + \frac{(y - y_i)^2}{K_y} + \frac{(z + b)^2}{K_z}} \sqrt{\frac{U^2 \cos^2 \alpha}{K_x} + \frac{(U \sin \alpha - V)^2}{K_y} + \frac{W^2}{K_z}} \right) / \left(4\pi \sqrt{K_x K_y K_z} \sqrt{\frac{x^2}{K_x} + \frac{(y - y_i)^2}{K_y} + \frac{(z + b)^2}{K_z}} \right).$$

Решение строится в виде $\varphi(y_i, x, y, z) = \varphi^+(y_i, x, y, z) + \varphi^-(y_i, x, y, z)$ либо $\varphi(t_i, x, y, z) = \varphi^+(t_i, x, y, z) + \varphi^-(t_i, x, y, z)$. Суммарная концентрация Φ примесей в произвольной точке (x, y, z) от случайного числа \tilde{N} автомобилей, находящихся на рассматриваемом участке трассы длиной L , может быть определена как функция координат y_i автомобилей или времени t :

$$\Phi(x, y, z) = \sum_{i=1}^{\tilde{N}} \varphi(y_i, x, y, z), \quad \Phi(x, y, z) = \sum_{i=1}^{\tilde{N}} \varphi(t - T_i, x, y, z), \quad (6)$$

где T_i — момент появления i -го автомобиля в начале автотрассы.

Зависимости (6) позволяют определить математическое ожидание $M_\Phi = \langle \Phi \rangle$ и среднеквадратичное отклонение $\sigma_\Phi = \sqrt{\langle [\Phi - \langle \Phi \rangle]^2 \rangle}$ для любой точки области G . Интервалы Δt между моментами появления автомобилей T_i распределены по закону $p(\Delta t) = \lambda \exp(-\lambda \Delta t)$. Математическое ожидание расстояния $\Delta y = V \Delta t$ между автомобилями на автотрассе

$$\langle \Delta y \rangle = \int_0^\infty \Delta y p(\Delta y) d(\Delta y) = \frac{\lambda}{V} \int_0^\infty \Delta y \exp\left(-\frac{\lambda \Delta y}{V}\right) d(\Delta y) = \frac{V}{\lambda}.$$

Длина колонны автомобилей определяется суммой случайного числа случайных величин $\tilde{L} = \sum_{i=1}^{\tilde{N}} \Delta y_i$. Следовательно, математическое ожидание ее длины $\langle \tilde{L} \rangle = \left\langle \sum_{i=1}^{\tilde{N}} \Delta y_i \right\rangle = \langle \tilde{N} \rangle \langle \Delta y \rangle$. Среднестатистическое количество автомобилей на трассе $N = \langle \tilde{N} \rangle = \langle \tilde{L} \rangle / \langle \Delta y \rangle = \lambda L / V$. Поскольку рассматривается стационарный пуассоновский [13] поток автомобилей, имеет место соотношение $D[\tilde{N}] = \langle \tilde{N} \rangle = L \lambda / V$. Математическое ожидание концентрации и ее среднеквадратичное отклонение в контрольной точке с учетом (6)

$$M_\Phi(x, y, z) = \left\langle \sum_{i=1}^{\tilde{N}} \varphi(y_i, x, y, z) \right\rangle = \langle \tilde{N} \rangle \langle \varphi(y_i, x, y, z) \rangle = \frac{\lambda}{V} \int_{-0,5L}^{0,5L} \varphi(y_i, x, y, z) dy_i; \quad (7)$$

$$\sigma_\Phi(x, y, z) = \sqrt{\langle \tilde{N} \rangle D[\varphi(y_i, x, y, z)] + D[\tilde{N}] \langle \varphi(y_i, x, y, z) \rangle^2} = \sqrt{\frac{\lambda}{V} \int_{-0,5L}^{0,5L} \varphi^2(y_i, x, y, z) dy_i}. \quad (8)$$

При известной плотности распределения вероятности направления ветра $p(\alpha)$ математическое ожидание концентрации примесей вычисляется по формуле

$$M_\Phi^\alpha(x, y, z) = \frac{\lambda}{V} \int_{-0,5L}^{0,5L} \int_0^{2\pi} \varphi(y_i, x, y, z) p(\alpha) d\alpha dy_i. \quad (9)$$

Выражения (7)–(9) не зависят от времени, что свидетельствует о стационарности случайного процесса поступления газовых выхлопов от автомобильного транспорта в любую точку рассматриваемой области G . Для автотрассы с многополосным движением (либо автотранспортными средствами различного типа) выражения для математического ожидания и среднеквадратичного отклонения имеют вид

$$M_\Phi(x, y, z) = \sum_i \frac{\lambda_j}{V_j} \int_{-0,5L}^{0,5L} \varphi_j(y_i, x, y, z) dy_i, \quad \sigma_\Phi(x, y, z) = \sqrt{\sum_j \frac{\lambda_j}{V_j} \int_{-0,5L}^{0,5L} \varphi_j^2(y_i, x, y, z) dy_i},$$

где $\varphi_j(y_i, x, y, z)$ — концентрация примеси от подвижных источников j -й полосы (j -го типа), имеющих мощность выброса q_j , скорость V_j и интенсивность λ_j .

Распределение математического ожидания (7) концентрации примесей в вертикальной плоскости $y = 0$, одинаково удаленной от концов рассматриваемого участка, зависит от длины дороги, причем эта зависимость, как следует из соотношений (4) и (5), уменьшается с увеличением ее длины. Для определения представительного размера L участка дороги, достаточного для оценки распределения концентрации примесей в заданной области, например $G_1 = \{(x, z) \mid x \in [10, 200], z \in [0, 100]\}$ ($x \geq 0$ для исключения сингулярности в точке $x = 0, z = b$), строится функционал $I(L)$, определяющий для двух значений L и $L + \Delta L$ максимальное различие двух решений (математических ожиданий) по всей рассматриваемой области:

$$I(L) = \frac{\lambda}{V} \max_{x, z \in G_1} \left| \int_{-0,5L-\Delta L}^{0,5L+\Delta L} \varphi(y_i, x, 0, z) dy_i - \int_{-0,5L}^{0,5L} \varphi(y_i, x, 0, z) dy_i \right|. \quad (10)$$

Значение L , при котором этот функционал становится минимальным, позволяет объективно оценить необходимую наименьшую длину участка трассы, при дальнейшем увеличении которой изменение математического ожидания концентрации примесей будет пренебрежимо мало. Участок дороги такой длины можно рассматривать как представительный, а данные, полученные на этом участке, использовать при оценке концентрации примесей на всей дороге.

Исследуем возможность аппроксимации нестационарного переноса и рассеяния в пространственной области газовых выбросов от случайно появляющихся автомобилей процессом диффузии примесей от прямолинейного стационарного источника постоянной интенсивности, описываемым двумерным дифференциальным уравнением

$$U \cos \alpha \frac{\partial \varphi}{\partial x} + W \frac{\partial \varphi}{\partial z} = K_x \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + K_z \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + Q \delta(x, z - b)$$

с граничными условиями $\varphi \rightarrow 0, x \rightarrow \pm\infty, z \rightarrow \infty$ и $\partial \varphi(x, 0)/\partial z = 0$, где Q — искомая мощность прямолинейного источника примеси, аппроксимирующего суммарный выброс автотранспорта. Решение этого уравнения имеет вид [12]

$$\begin{aligned} \varphi(x, z) = & \frac{Q}{2\pi\sqrt{K_x K_z}} \left[K_0 \left(0,5 \sqrt{\frac{U^2 \cos^2 \alpha}{K_x} + \frac{W^2}{K_z}} \sqrt{\frac{x^2}{K_x} + \frac{(z-b)^2}{K_z}} \right) \exp\left(\frac{xU \cos \alpha}{2K_x} + \frac{(z-b)W}{2K_z}\right) + \right. \\ & \left. + K_0 \left(0,5 \sqrt{\frac{U^2 \cos^2 \alpha}{K_x} + \frac{W^2}{K_z}} \sqrt{\frac{x^2}{K_x} + \frac{(z+b)^2}{K_z}} \right) \exp\left(\frac{xU \cos \alpha}{2K_x} - \frac{(z+b)W}{2K_z}\right) \right], \quad (11) \end{aligned}$$

где K_0 — функция Макдональда. Выражения (7) и (11) представим в виде

$$M_\Phi(x, 0, z) = \frac{q\lambda}{4\pi V \sqrt{K_x K_y K_z}} \omega(x, z), \quad \varphi(x, z) = \frac{Q}{2\pi \sqrt{K_x K_z}} \theta(x, z),$$

где вид функций $\omega(x, z)$ и $\theta(x, z)$ определяется сравнением этих соотношений с (5)–(7) и (11) соответственно. Для оценки меры близости функций M_Φ и φ используется квадрат нормы

$$J = \|M_\Phi - \varphi\|_{G_1}^2 = \frac{Q^2}{4\pi^2 K_x K_z} \|\theta\|_{G_1}^2 - \frac{qQ\lambda}{4\pi^2 V K_x K_z \sqrt{K_y}} (\theta, \omega) + \frac{q^2 \lambda^2}{16\pi^2 V^2 K_x K_y K_z} \|\omega\|_{G_1}^2.$$

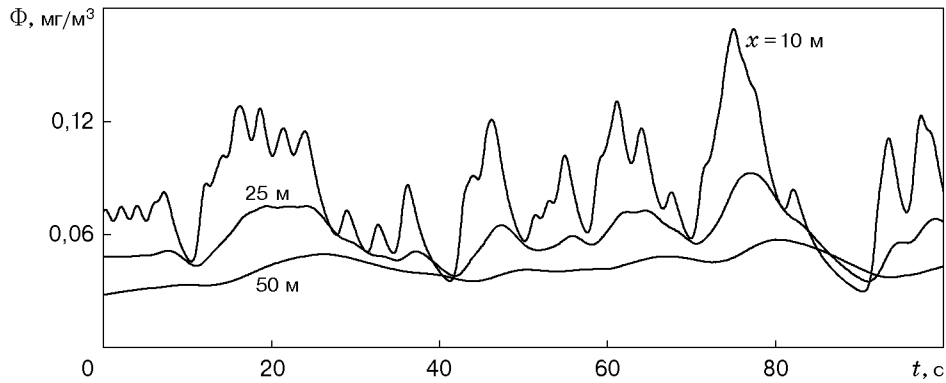


Рис. 2. Зависимость концентрации примесей от времени для случайного одностороннего однорядного потока автомобилей на различных расстояниях x от дороги

Минимум J соответствует значению Q , при котором распределение примеси от случайного потока автомобилей в области G_1 аппроксимируется наиболее точно. Обозначая $(\theta, \omega) = \int_{G_1} \theta(x, z)\omega(x, z) dx dz$, $\|\theta\|_{G_1}^2 = \int_{G_1} \theta^2(x, z) dx dz$, получаем

$$\frac{dJ}{dQ} = 0, \quad Q = \frac{q\lambda(\theta, \omega)}{2V\sqrt{K_y}\|\theta\|_{G_1}^2}. \quad (12)$$

При численном исследовании принято [1, 14, 15], что длина рассматриваемого участка дороги $L = 1000$ м; расстояние между источниками и дорогой $b = 0,5$ м; интенсивность движения $\lambda = 0,5$ с⁻¹; угол $\alpha = 0$; скорость автомобилей $V = 12,5$ м/с; скорость воздушного потока $U = 3$ м/с; скорость осаждения оксида углерода $W = 0$; коэффициенты турбулентной диффузии $K_x = K_y = 67$ м²/с, $K_z = 26$ м²/с; мощность точечных источников $q_{CO} = 0,12 \cdot 10^{-3}$ кг/с.

Поступление автомобилей в начальную точку автотрассы имитируется с помощью генератора стационарного пуассоновского процесса. Для каждого момента времени по известной скорости V отслеживаются положения на дороге всех точечных источников примеси мощностью q и определяются соответствующие им поля концентраций газовых выбросов, после чего поля концентраций суммируются. Как следствие концентрации примеси во всех точках области описываются случайными функциями. Отдельные реализации этих функций (для точек, расположенных в вертикальной плоскости $y = 0$ на высоте 2 м от поверхности и расстояниях 10, 25 и 50 м от трассы) приведены на рис. 2.

Для одной из точек ($x = 10$ м, $y = 0$, $z = 2$ м) определяются средние концен-

трации $\bar{\Phi} = \frac{1}{t} \int_0^t \Phi(\tau) d\tau$ и среднеквадратичные отклонения концентрации примесей $s_\Phi =$

$\left[\frac{1}{t} \int_0^t (\Phi(\tau) - \bar{\Phi})^2 d\tau \right]^{1/2}$ от среднего значения $\bar{\Phi}$ с использованием реализаций случайного

процесса одностороннего однорядного движения (рис. 3). Эти результаты демонстрируют сходимость $\bar{\Phi} \rightarrow M_\Phi$, $s_\Phi \rightarrow \sigma_\Phi$ при $t \rightarrow \infty$ и позволяют оценить время установления среднего значения концентрации, близкого к истинной величине математического ожидания. Для рассматриваемых условий это время составляет около 30 мин (отклонение $\bar{\Phi}$ от точного значения M_Φ лежит в пределах 2,5 %).

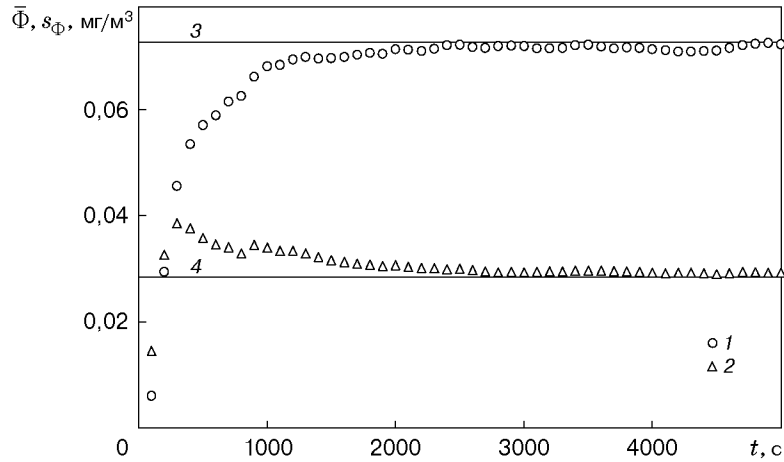


Рис. 3. Сходимость значений средней концентрации (1) и ее среднеквадратичного отклонения (2) к точным значениям M_Φ (3) и σ_Φ (4)

Вычисления функционала (10) при $\Delta L = 10$ м показали, что $I(L) = 0,889 \cdot 10^{-3}$ мг/м³ и $I(L + \Delta L) = 0,881 \cdot 10^{-3}$ мг/м³ уже для $L = 1000$ м (различие менее 1%). Следовательно, для моделирования стационарного поступления примеси в исследуемую область достаточно рассмотреть участок указанной длины. Распределения математического ожидания M_Φ и среднеквадратичного отклонения σ_Φ концентрации примеси на части области G_1 при $L = 1000$ м представлены на рис. 4.

Для оценки возможности аппроксимации математического ожидания $M_\Phi(x, 0, z)$, определяемого выражением (7), распределением $\varphi(x, z)$ концентрации примеси от прямолинейного стационарного источника мощностью Q , используется формула (12). Вычисления для $G_1 = \{(x, z) \mid x \in [10, 200], z \in [0, 100]\}$ дают значение $Q = 7,1824 \cdot 10^{-6}$ кг/(м · с). Следует отметить, что тождественной замены функции $M_\Phi(x, 0, z)$ распределением концентрации примеси $\varphi(x, z)$ от прямолинейного источника постоянной мощности достичь не удается.

В заключение рассматриваются перенос, рассеяние и оседание соединений свинца, выбрасываемых автомобильным четырехрядным потоком. Средняя скорость выпадения

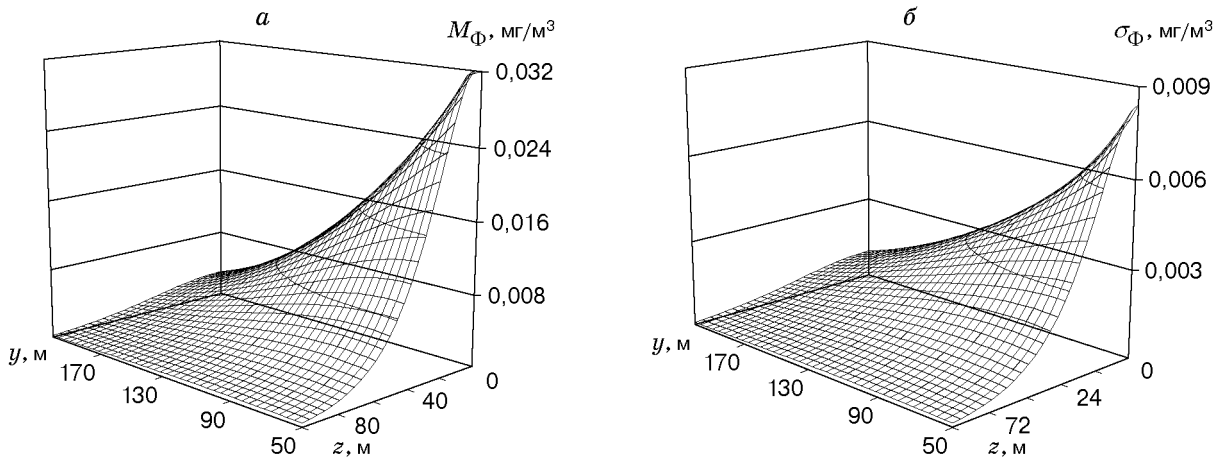


Рис. 4. Распределения на части области G_1 математического ожидания M_Φ (а) и среднеквадратичного отклонения концентрации примесей σ_Φ (б) при $L = 1000$ м

α , град	f	α , град	f
45	0,02	225	0,05
90	0,10	270	0,24
135	0,06	315	0,10
180	0,12	360	0,16

тяжелых частиц, содержащих свинец, оценивается в [16] значением $W = -0,002$ м/с. Согласно [15] $q_{р\text{б}} = 1,2 \cdot 10^{-3}$ кг/с, $\lambda = 2$ с $^{-1}$. Остальные параметры остаются прежними. Распределение направлений ветра в течение года (роза ветров относительно рассматриваемого участка дороги [17]) приведено в таблице (f — относительная частота). Распределение математического ожидания концентрации соединений свинца на поверхности почвы ($z = 0$) при постоянном направлении ветра ($\alpha = 0$) с учетом указанной розы ветров приведено на рис. 5.

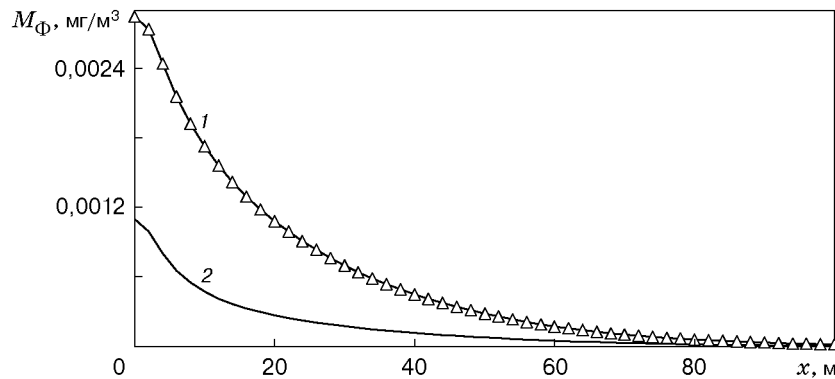


Рис. 5. Распределение математического ожидания концентрации тяжелой примеси от случайного потока автомобилей:

1 — при постоянном направлении ветра; 2 — с учетом розы ветров

Таким образом, в работе рассмотрена постановка и приведено приближенное решение пространственной задачи о переносе и рассеянии легких и тяжелых примесей от движущихся автомобилей, случайный поток которых считается пуассоновским. В результате вычислительного эксперимента установлено, что для участков дороги большой протяженности и значительных интервалов времени математическое ожидание концентрации поступающих примесей можно считать не зависящей от времени величиной. Это позволяет аппроксимировать нестационарный процесс поступления примесей от случайно появляющихся автомобилей стационарной моделью с непрерывно распределенным вдоль дороги источником примесей постоянной мощности. Представленная модель позволяет обосновать минимально необходимое время натурных измерений, в течение которого среднее значение концентрации приближается к величине математического ожидания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Родивилова О. В., Костров В. В., Шведова Л. В., Кривцова Е. В. Загрязнение атмосферы г. Иванова отработавшими газами автотранспорта // Инж. экология. 1996. № 4. С. 100–107.
2. Таранков В. И., Матвеев С. М. О влиянии автотранспортного загрязнения на сосновые насаждения зеленой зоны г. Воронежа / Воронеж. лесотехн. ин-т. Воронеж, 1992. Деп. в ВНИИЦлесресурсы 26.10.92, № 910-лх92.

3. **Волкова О. Д., Самойлова Т. С.** Методология экологического нормирования нагрузок выбросов автотранспорта на лесные экосистемы // Экологическое нормирование: проблемы и методы. М., 1992. С. 35–37.
4. **Chock D. P.** A simple line-source model for dispersion near roadways // Atmos. Environ. 1978. V. 12, N 4. P. 823–829.
5. **Luhar A. K., Patil R. S.** A general finite line source model for vehicular pollution prediction // Atmos. Environ. 1989. V. 23, N 3. P. 555–562.
6. **Csanady G. T.** Crosswind shear quality model performance — a summary of the AMS workshop on dispersion model performance // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1981. V. 61. P. 599–609.
7. **Sivacoumar R., Thanasekaran K.** Line source model for vehicular pollution prediction near roadways and model evaluation through statistical analysis // Environ. Pollut. 1998. V. 104, N 2. P. 389–395.
8. **Luhar A. K., Patil R. S.** Estimation of emission factors for Indian Vehicles // Indian J. Air Pollut. Control. 1986. V. 7. P. 155–160.
9. **Heidorn K. C., Davies A. E., Murphy M. C.** Wind tunnel modelling of roadways: comparison with mathematical models // J. Air Waste Managment Assoc. 1991. V. 41, N 11. P. 1469–1475.
10. **Moriguchi Y., Uehara K.** Numerical and experimental simulation of vehicle exhaust gas dispersion for complex urban roadways and their surroundings // J. Wind. Engng. 1987. V. 25, N 2. P. 102–107.
11. **Kasibhatla P. S., Peters L. K., Fairweather G.** Numerical simulation of transport from an infinite line source: Error analysis // Atmos. Environ. 1988. V. 22, N 1. P. 75–82.
12. **Марчук Г. И.** Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982.
13. **Вентцель Е. С., Овчаров Л. А.** Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1991.
14. **Филиппов И. Г., Горский В. Г., Швецова-Шиловская Т. Н.** О рассеянии примеси в приземном слое атмосферы // Теорет. основы хим. технологии. 1995. Т. 29, № 5. С. 517–521.
15. **Рузский А. В., Донченко В. В., Петрухин В. А. и др.** Методика расчетов выбросов в атмосферу загрязняющих веществ автотранспортом на городских магистралях. М.: Науч.-исслед. ин-т “Атмосфера”, 1996.
16. **Черногаева Г. М., Петрухин В. А., Громов С. А.** Баланс загрязняющих веществ в речных бассейнах некоторых фоновых районов СССР // Мониторинг фонового загрязнения природных сред. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. Вып. 6. С. 171–174.
17. **Состояние** окружающей среды и здоровья населения Перми в 1997 году: Справ.-информ. материалы. Пермь: Перм. город. Комитет по охране природы, 1998.

*Поступила в редакцию 23/II 2000 г.,
в окончательном варианте — 24/IV 2000 г.*
