

Моделирование воздействия аэрозольных примесей от локально-распределенных источников на окружающую среду

А.В. ШАТРОВ¹

¹ Вятский государственный университет, г. Киров, Россия

Аннотация. Задачи охраны окружающей среды (ОС) требуют исследования процессов переноса, локальных концентраций видов загрязняющих веществ (ЗВ) в различных средах. Для этих целей важнейшим средством является создание моделей, позволяющих адекватно оценивать и прогнозировать процессы загрязнения ОС и масштабы возможных последствий. В данной работе предусматривается создание на основе разработанных математических моделей и комплексов программ системы анализа и мониторинга состояния атмосферных потоков в окрестностях захоронения и использования полигонов твердых бытовых отходов (ТБО), а также крупных предприятий на территории Кировской области.

Ключевые слова: математическое моделирование, процессы переноса аэрозольных примесей, приземный пограничный слой.

DOI: 10.14357/20790279180216

Введение

Одними из наиболее распространенных источников ЗВ являются полигоны ТБО. Ежегодно в окрестностях города с миллионным населением образуется примерно 3,5 млн тонн мусора. Постановка задачи переноса ЗВ предполагает использование последовательности математических моделей, построенных по принципу Н.Н. Моисеева [1, с. 160] «от простого к сложному». Эта последовательность определяется выбором масштаба моделирования. Если мы определяем некоторую, достаточно малую окрестность области распространения ЗВ за конечный отрезок времени, то вполне обосновано применение упрощенных, в том числе стационарных моделей, допускающих точные решения. В случае задач с протяженной геометрией, или с достаточно мощными источниками ЗВ, например, при оценке выбросов от крупных промышленных предприятий, необходимо учитывать сложную динамику поля скоростей и температур, неоднородность поверхности и граничных условий. Исследования по переносу ЗВ в атмосфере широко представлены в работах научной школы Г.И. Марчука. В работе [2, с. 9] представлена система моделей по оценке воздействия аэрозольных примесей на ОС в микро- и мезо масштабах, что является актуальным при учете работы действующих полигонов ТБО.

Постановка упрощенных стационарных задач. Процесс переноса и диффузии ЗВ удобнее рассмотреть сначала на простейших примерах одномерных задач. Если предположить, что нас интересует распределение ЗВ в некоторой окрестности источника загрязнений за относительно небольшой промежуток времени, то вполне можно использовать одномерное стационарное приближение с учетом диффузии и адвективного переноса. Данный подход рассматривается в [2, с. 27]. Уравнение переноса концентрации примеси φ имеет вид:

$$u \frac{d\varphi}{dx} + \sigma\varphi = \mu\Delta\varphi + Q\delta(x - x_0), \quad (1)$$

с граничными условиями

$$x \rightarrow \pm\infty: \varphi = 0, \quad (2)$$

где u – скорость ветра в направлении оси Ox считается заданной и постоянной; σ – коэффициент взаимодействия примеси с воздухом, показывает, какая часть примеси остается в потоке; μ – коэффициент диффузии; Q – мощность точечного источника загрязнений; x_0 – координата источника; $\delta(x - x_0)$ – дельта-функция.

Уравнение (1) с условиями (2) имеет точное решение, которое можно с учетом принятых допущений считать оценкой «сверху» для распределения

* Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 16-07-20394.

примеси в окрестности локального источника. С учетом сингулярности в точке x_0 решение имеет вид:

$$\varphi(x) = \begin{cases} \frac{Q}{\sqrt{4\sigma + u^2}} \exp\left[-\left(\sqrt{\frac{\sigma}{\mu} + \frac{u^2}{4\mu^2}} + \frac{u}{2\mu}\right)(x_0 - x)\right], & x \leq x_0 \\ \frac{Q}{\sqrt{4\sigma + u^2}} \exp\left[-\left(\sqrt{\frac{\sigma}{\mu} + \frac{u^2}{4\mu^2}} - \frac{u}{2\mu}\right)(x - x_0)\right], & x > x_0 \end{cases} \quad (3)$$

Решение (3) описывает частный случай переноса примеси с постоянными входными данными. Однако набор таких частных решений можно использовать при более сложных реальных ситуациях, которые возникают в различных периодах времени, характерные масштабы которых известны. Существуют точные решения двумерных стационарных и нестационарных задач при условии постоянства заданного поля скоростей потока [2, с. 58]. Точные решения могут быть использованы как оценки распределений концентраций ЗВ. При необходимости уточнения этих оценок можно использовать численные модели полных уравнений переноса.

Мезомасштабная квази-двумерная модель переноса ЗВ в приземном слое. Модели мезомасштабных атмосферных процессов [3, с.332] используются для изучения конвективных процессов переноса примеси в нижнем слое атмосферы. При его исследовании отмечено, что над большим населенным пунктом возникает тепловое пятно антропогенного характера. Отмечена важность воздействия термической неоднородности подстилающей поверхности на мезомасштабные атмосферные процессы. В нашей работе пред-

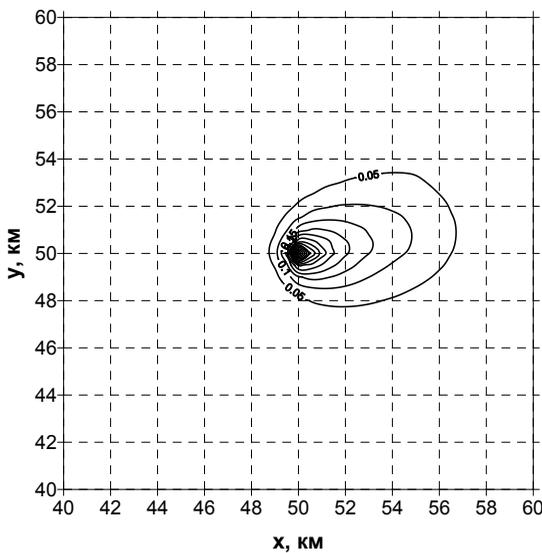


Рис. 1. Распределение концентрации ЗВ

лагается квази-двумерная модель, описывающая трехмерные конвективные процессы в тонком вращающемся слое воздуха при наличии антропогенных источников тепла и примеси. Рассмотрим пограничный слой атмосферы, для которого высота слоя D и горизонтальный масштаб движения L удовлетворяют соотношению: $\delta = \frac{D}{L} < 1$.

Вывод уравнений соответствует методике, представленной в работе [3, с.332]. Ограничиваемся рассмотрением мезомасштабных процессов в системе координат x, y, z , полагая, что $t > t_r$, где t – характерное время равновесных состояний, а t_r – время релаксации воздушных течений к состоянию равновесия при изменении внешних условий. Введем безразмерную переменную $\zeta = z/D$, обозначим среднюю поперек слоя величину

$$\langle g \rangle = \int_0^1 g(t, x, y, \zeta) d\zeta \quad (5)$$

после осреднения переменных по координате ζ рассмотрим асимптотическое приближение полной трехмерной задачи. Для этого воспользуемся точным решением исходной задачи, которое можно найти в случае, когда вертикальная компонента скорости постоянна ввиду ее относительной малости. Решение ищем в виде $u = u(\zeta)$, $v = v(\zeta)$, $w \equiv 0$, $\theta = \theta_0 + \theta(\zeta)$, $\varphi = \varphi(\zeta)$, тогда исходная задача становится линейной краевой задачей для обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, решение которой

$$M(\zeta) = f_1(\zeta) < M > -2f_2(\zeta)U, \quad (6)$$

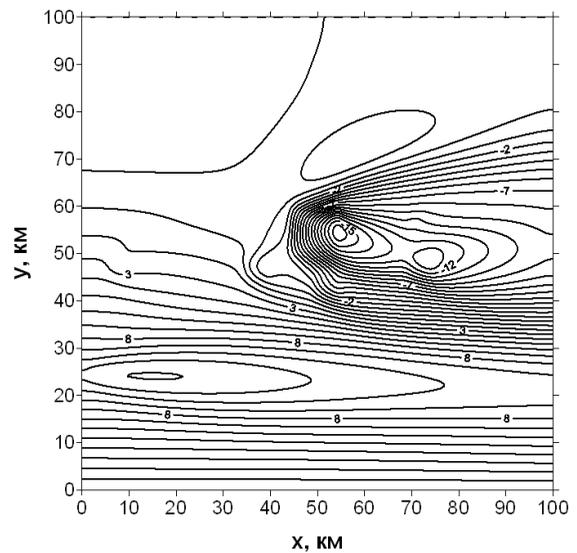


Рис. 2. Распределение поля температур

где:

$$f_1 = \frac{1}{1 - th(\lambda)/\lambda} \left[1 - \frac{ch\lambda\zeta}{ch\lambda} \right],$$

$$f_2 = \left[\frac{th\lambda}{\lambda} + \frac{1 - ch\lambda}{\lambda^2 ch\lambda} - \frac{1}{2} \right] f_1(\zeta) - \frac{ch\lambda\zeta}{ch\lambda} - \frac{sh\lambda(\zeta - 1)}{\lambda ch\lambda} + \zeta,$$

$$\lambda = \frac{1 + i}{\sqrt{2Ek}}, \quad Ek = \frac{k_M}{ID^2} \quad - \text{число Экмана,}$$

$M(\zeta) = u(\zeta) + iv(\zeta)$, $U = u_x + iu_y$, $u_{x,y} = \mp \beta D \partial_{y,x} \langle \theta \rangle$ – компоненты «термического ветра», $\theta \approx \langle \theta \rangle$,

$$\varphi = \langle \varphi \rangle + \frac{f_S D}{\alpha D ch(S) + S sh(S)} \left[ch(S(1 - \zeta)) - \frac{sh(S)}{S} \right],$$

$$S^2 = \frac{\sigma D^2}{k_S}. \text{ Система безразмерных уравнений}$$

$$\text{в терминах функции вихря } \omega(t, x, y) = \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial x} - \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial y},$$

$$\text{функции тока } \psi(t, x, y): \langle u \rangle = -\frac{\partial \psi}{\partial y}, \langle v \rangle = -\frac{\partial \psi}{\partial x},$$

$$\text{безразмерной температуры } \theta = \frac{\beta D}{2l} \langle \theta \rangle, \text{ средней}$$

поперек слоя концентрации $\varphi(t, x, y)$, отнесенной к $\varphi_{ПДК}$ получена по аналогии с [3, с. 332]. Программная реализация модели выполнена для анализа и прогноза состояния загрязнения г. Кирова и его окрестностей на участке 100×100 км. Параллельная версия алгоритма расчета выполнена на языке программирования Intel Fortran 12 в среде Open MP [4]. Расчеты проводились на основе конечно-разностной аппроксимации системы уравнений. Использовалась явная конечно-разностная схема на сетке 500×500 узлов. Скорость западного ветра c_g варьировалась от 1 до 10 m/sec. Учет взаимодействия аэрозольной примеси с подстилающей поверхностью производился на основании неоднородности распределения температуры и коэффициента поглощения $\alpha = f(x, y)$ по информации карты землепользования расчетной области. Температура воздуха колебалась от 18°C вне населенных пунктов до 23°C в г. Кирове и Кирово-Чепецке. Коэффициент $\alpha = 0,0139 \text{ 1/m}$ вне населенных

пунктов и $\alpha = 0,00139 \text{ 1/m}$ на территории поселений, $l = 1,24 \cdot 10^{-4} \text{ 1/sec}$, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ 1/sec}$ и $\gamma = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ 1/m}$. Результаты расчетов приведены на рис. 1,2.

Заключение

В работе предлагаются модели переноса аэрозольных ЗВ атмосферными потоками от локально-распределенных источников загрязнений. В квази-двумерном приближении с учетом неоднородности рельефа и температуры подстилающей поверхности получены распределения полей концентрации ЗВ, возмущений функции тока и температуры. Показано, что в окрестности крупных населенных пунктов образуются «тепловые и концентрационные пятна», обусловленные неоднородностью потоков. Отмечена важность воздействия термической неоднородности подстилающей поверхности на мезомасштабные атмосферные процессы. Расчеты выполнены на основе данных для гг. Кирова и Кирово-Чепецка и могут быть использованы в региональной системе мониторинга состояния окружающей среды.

Литература

1. *Мусеев Н.Н.* Избранные труды в 2-х т. Т.1 Гидродинамика и механика. М: Тайдекс Ко, 2003.
2. *Марчук Г.И.* Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М: Наука, 1982.
3. *Shatrov A.V. and K.G. Shvarts.* Numerical modeling of mesoscale atmospheric impurity transport processes in the environs of the city of Kirov // 2011. Fluid Dynamics 46: 332-339. doi:10.1134/S0015462811020165
4. *Рычков С.Л., Шатров А.В., Шварц К.Г.* Расчет переноса аэрозольной примеси в приземном пограничном слое // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015662922 .- Реестр гос. регистрации программ для ЭВМ 07.12.2015

Шатров Анатолий Викторович. Вятский государственный университет, г. Киров, Россия. Заведующий кафедрой математического моделирования, профессор. Доктор физико-математических наук. Количество печатных работ: 120. Область научных интересов: математическое моделирование, вычислительная математика, информационные технологии. E-mail: avshatrov1@yandex.ru

Modeling of influence of aerosol impurity from the local distributed sources on the environment

*A.V. Shatrov*¹

¹ Vyatka State University, Kirov, Russia

Abstract. Problems of environmental protection (EP) demand a research of processes of transfer, local concentration of types of pollutants (P) in various environments. For this purpose the main means – creation of the models allowing estimating and predicting respectively processes of pollution of EP and scales of possible consequences. In creation of this work on the basis of the developed mathematical models and complexes of programs of system of the analysis and control of a condition of atmospheric streams around a funeral and use of burying garbage of solid waste and also the large enterprises in the territory of the Kirov region it is provided. In models of work of transfer of an aerosol as atmospheric streams from the local distributed sources of pollution are offered. The model in quasi two-dimensional approach gives distribution of concentration of impurity, fields of flow and temperatures. It is shown that near big cities “thermal spots” are formed. Importance of influence of thermal heterogeneity of the extending surface in mesolarge-scale on atmospheric processes is noted. Calculations are executed on the basis of data for the cities of Kirov and Kirovo-Chepetsk and can be used in the regional control system of the environment.

Keywords: *mathematical modeling, processes of transfer of aerosols impurity, boundary layer.*

DOI: 10.14357/20790279180216

References

1. *Moiseev N.N.* Izbrannye Trudy tom. 1 Gidrodinamika i mekhanika, eds. 2003 [Selected Proceedings: Vol. 1 Hydrodynamics and Mechanics]. Moscow: Tidend Co. Publishing.
2. *Marchuk G.I.* Matematicheskoe modelirovanie v probleme okruzhayushchej sredy, eds. 1982 [Mathematical modeling for problems of environment]. Moscow: Science Publishing.
3. *Shatrov A.V. and Shvarts K.G.* 2011. Numerical modeling of mesoscale atmospheric impurity transport processes in the environs of the city of Kirov. Fluid Dynamics 46: 332-339. doi:10.1134/S0015462811020165
4. *Rychkov S.I., Shatrov A.V. and Shvarts K.G.* 2015. Raschyot perenosa aerol'noj primesi v prizemnom pogramichnom sloe [Prediction of transfer for aerosol impurity on boundary layer] Certificate on official registration of the computer program No. 2015662922. (In Russian, unpubl.)

Shatrov Anatoly Victorovich. Head of Department of Mathematical Modeling, Vyatka State University, Russia, Kirov city, Moskovskaya str., 36. Professor, Doctor of Physics and Mathematics. In 1975 graduated from Perm State University. Full content of publication – 120 art. Area of scientific interests: mathematical modeling, calculus mathematics, information technologies for environment. E-mail: avshatrov1@yandex.ru