

Электронный научный журнал "Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках" <http://mathmod.esrae.ru/>

URL статьи: mathmod.esrae.ru/17-61

Ссылка для цитирования этой статьи:

Кушелева Е.В., Кушников В.А., Резчиков А.Ф., Иващенко В.А. Моделирование распространения атмосферных поллютантов от дорог с затрудненным движением // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2018. №1

УДК: 517.958

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ПОЛЛЮТАНТОВ ОТ ДОРОГ С ЗАТРУДНЕННЫМ ДВИЖЕНИЕМ

Кушелева Е.В.¹, Кушников В.А.², Резчиков А.Ф.³, Иващенко В.А.⁴

¹ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», Россия, Саратов,
kushelevae@mail.ru

²ФГБУН Институт проблем точной механики и управления РАН; ФГБОУ ВО
«СГУ имени Н.Г. Чернышевского», Россия, Саратов, kushnikoff@yandex.ru

³ФГБУН Институт проблем точной механики и управления РАН; ФГБОУ ВО
«СГУ имени Н.Г. Чернышевского», Россия, Саратов, iptmuran@san.ru

⁴ФГБУН Институт проблем точной механики и управления РАН, Россия,
Саратов, iptmuran@san.ru

MODELING OF THE DISTRIBUTION OF ATMOSPHERIC POLLUTANTS FROM ROADS WITH JAM-UP

Kusheleva E.V.¹, Kushnikov V.A.², Rezchikov A.F.³, Ivashchenko V.A.⁴

¹Saratov State University, Russia, Saratov, kushelevae@mail.ru

²Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov State University,
Russia, Saratov, kushnikoff@yandex.ru

³Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov State University,
Russia, Saratov, iptmuran@san.ru

⁴Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Russia, Saratov,
iptmuran@san.ru

Аннотация. Рассматривается задача мониторинга распространения атмосферных загрязнителей, выброшенных от дорог с затрудненным движением. Разработана математическая модель для прогнозирования уровня загрязнения атмосферного воздуха в точках контролируемой территории. Для решения моделирующего уравнения предложена конечно-разностная схема, учитывается необходимое условие ее устойчивости. Разработанный программный продукт позволяет наглядно визуализировать динамику распространения атмосферного поллютанта от участка дороги с затором.

Ключевые слова: выбросы автотранспорта, математическая модель, разностная схема.

Abstract. The problem of monitoring the distribution of atmospheric pollutants, ejected from roads with traffic-jam. A mathematical model has been developed to predict the level of atmospheric air pollution in a controlled area. To solve the modeling equation, a finite-difference scheme is proposed, and a necessary condition for its stability is revealed. The developed software product allows visualizing the dynamics of atmospheric pollutant distribution.

Keywords: emissions of motor vehicles, mathematical model, difference scheme.

Автомобильный транспорт является одним из наиболее мощных источников эмиссии поллютантов в атмосферу. Стремительный рост количества автотранспортных средств приводит к увеличению интенсивности загрязнения приземного слоя атмосферы, в том числе воздушных бассейнов над городами. Вследствие чего происходит рост заболеваемости населения, снижается продолжительность и качество жизни [1].

В связи с увеличением количества автотранспорта все более усугубляется проблема затрудненного движения на дорогах. В результате заторов происходят массивные выбросы поллютантов в атмосферу. Наиболее остро проблема ощущается в жилых массивах и других социально-значимых объектах, размещенных на придорожных территориях [2].

Постановка задачи: разработать математическую модель для анализа динамики распространения атмосферного поллютанта, выброшенного от участка дороги с затрудненным движением, и прогнозирования его концентрации в заданных точках контролируемой территории.

Решение поставленной задачи проводится в два этапа.

На первом шаге необходимо определить количество источников вредных выбросов и их местонахождение. В зависимости от количества единиц экологически чистого транспорта на рассматриваемом участке дороги, производится расчет количества автотранспортных средств, загрязняющих атмосферу, которые впоследствии рассматриваются как точечные статичные источники эмиссии.

На втором шаге рассмотрим прогностическое уравнение турбулентной диффузии, представленное в [3]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial c}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial c}{\partial z} - \alpha c + \\ + Q(t) \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s), \quad (1)$$

где c – искомая концентрация токсичного вещества; x, y, z - координаты точки расчета по осям абсцисс, ординат и аппликата, соответственно; t - время; u, w, v - проекции вектора средней скорости перемещения вещества на оси абсцисс, ординат и аппликата соответственно; α - коэффициент изменения концентрации вещества из-за химических превращений; k_x, k_y, k_z - составляющие коэффициента обмена по осям x, y, z , соответственно; Q –

интенсивность выброса токсичного вещества; $\delta(x - x_s)$ - дельта-функция Дирака; x_s, y_s, z_s - координаты источника эмиссии токсичного вещества.

Уравнение (1) должно быть дополнено начальным и тремя граничными условиями по каждой из пространственных координат:

$$\begin{aligned} c(t = 0, x, y, z) &= \xi(x, y, z); \\ c &\rightarrow 0 \text{ при } |x| \rightarrow \infty; \\ c &\rightarrow 0 \text{ при } |y| \rightarrow \infty; \\ c &\rightarrow 0 \text{ при } |z| \rightarrow \infty. \end{aligned} \quad (2)$$

Т.к. в рассматриваемом случае присутствует не один, а несколько источников эмиссии, уравнение (1) примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial c}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial c}{\partial z} - \alpha c + \\ + \sum_{i=1}^m Q_i(t) \delta(x - x_{s_i}) \delta(y - y_{s_i}) \delta(z - z_{s_i}), \end{aligned} \quad (3)$$

где i - номер i -ого источника эмиссии; m - количество источников эмиссии; Q_i - интенсивность выброса токсичного вещества i -ого источника; $x_{s_i}, y_{s_i}, z_{s_i}$ - координаты i -ого источника.

Данная математическая модель позволяет вычислить концентрацию вредного вещества в любой точке исследуемого пространства с течением времени, учитывая количество и местонахождение рассматриваемых источников эмиссии.

В [4] предложен способ построения явной конечно-разностной схемы, аппроксимирующей уравнение (1). Аналогичным образом запишем явную конечно-разностную схему, аппроксимирующую уравнение (3), она будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \frac{c_{x,y,z}^{t+1} - c_{x,y,z}^t}{\Delta t} + \frac{c_{x,y,z}^t - c_{x-1,y,z}^t}{\Delta x} \left(u - \frac{dk_x}{dx} \right) + \frac{c_{x,y,z}^t - c_{x,y-1,z}^t}{\Delta y} \left(v - \frac{dk_y}{dy} \right) + \\ + \frac{c_{x,y,z}^t - c_{x,y,z-1}^t}{\Delta z} \left(w - \frac{dk_z}{dz} \right) = k_x \frac{c_{x+1,y,z}^t - 2c_{x,y,z}^t + c_{x-1,y,z}^t}{\Delta x^2} + \\ + k_y \frac{c_{x,y+1,z}^t - 2c_{x,y,z}^t + c_{x,y-1,z}^t}{\Delta y^2} + k_z \frac{c_{x,y,z+1}^t - 2c_{x,y,z}^t + c_{x,y,z-1}^t}{\Delta z^2} - \\ - \alpha c_{x,y,z}^t + \sum_{i=1}^m Q_i(t) \delta(x - x_{s_i}) \delta(y - y_{s_i}) \delta(z - z_{s_i}). \end{aligned} \quad (4)$$

Из полученного выражения можно явно выразить искомую величину концентрации в каждый следующий момент времени $c_{x,y,z}^{t+1}$.

Для возможности использования разностной схемы (4) необходимо исследовать ее устойчивость. Способ исследования устойчивости явной разностной схемы, аппроксимирующей уравнение (1), изложен в [5]. Воспользовавшись этим способом и проведя аналогичное исследование, получаем условие устойчивости для схемы (4):

$$\begin{aligned} \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot \left(u - \frac{\partial k_x}{\partial x} \right) + \frac{\Delta t}{\Delta y} \cdot \left(v - \frac{\partial k_y}{\partial y} \right) + \frac{\Delta t}{\Delta z} \cdot \left(w - \frac{\partial k_z}{\partial z} \right) + \\ + 2 \frac{k_x \Delta t}{\Delta x^2} + 2 \frac{k_y \Delta t}{\Delta y^2} + 2 \frac{k_z \Delta t}{\Delta z^2} + \frac{a \Delta t}{2} \leq 1. \end{aligned} \quad (5)$$

Разработанный программный продукт был применен для проведения серии вычислительных экспериментов по прогнозированию распространения шлейфа атмосферного поллютанта от автодороги с затором по контролируемой территории.

В качестве примера рассматривался участок дороги с затрудненным движением и расположенный рядом социально-значимый объект – детский сад. Был произведен расчет изменения концентрации вредного вещества во времени с учетом различных метеоусловий: при отсутствии направленного ветра (рис. 1) и при резком ветре, направленном в сторону контролируемого объекта (рис. 2).

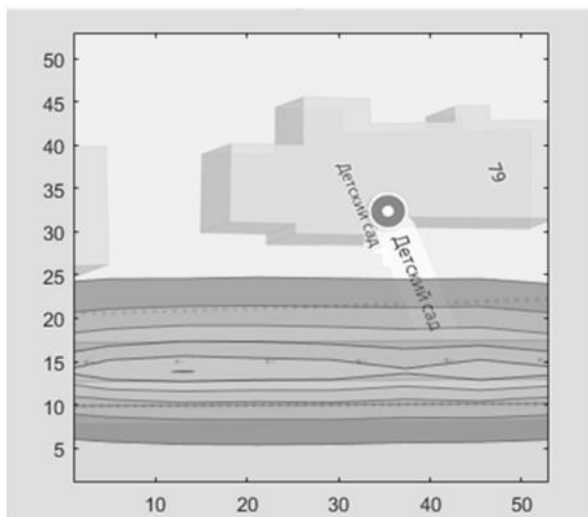


Рис.1. Распространение атмосферного поллютанта при спокойных метеоусловиях.

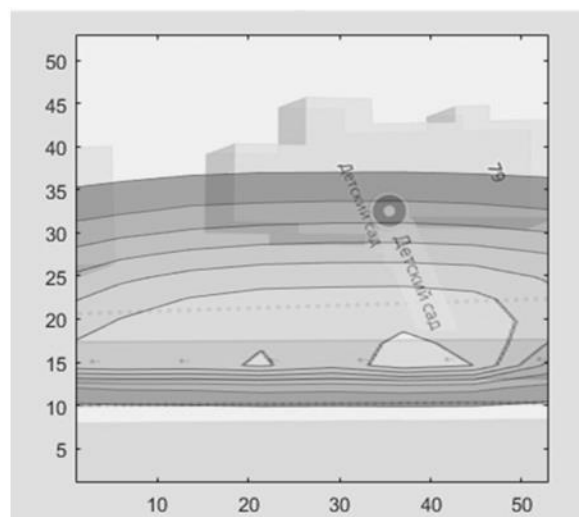


Рис.2. Распространение атмосферного поллютанта при направленном ветре.

На основании результатов вычислений можно сделать вывод, что при ветре, направленном в сторону детского сада, шлейф атмосферного поллютанта значительно покрывает территорию контролируемого объекта. Т.к. социально-значимый объект находится в непосредственной близости от автодороги, такая

ситуация может повторяться многократно, что несет вред и угрозу здоровью находящихся там людей. А это говорит о недопустимости расположения такого рода объектов в придорожной зоне.

Предлагаемый метод позволяет формировать прогноз возможных типовых ситуаций зон загрязнения атмосферного воздуха на улицах, что необходимо на этапе планирования новых и реконструкции старых районов больших городов для принятия решений, эффективных с точки зрения экологической безопасности населения.

Литература

1. Кушникова Е.В., Резчиков А.Ф. Задача минимизации ущерба от атмосферных выбросов промышленных предприятий // Сборник научных статей по материалам Международной научной конференции ICIT 2014 «Информационно – коммуникационные технологии в науке, производстве и образовании». Саратов, 2014. С.124 – 127.
2. Кушникова Е.В. Постановка задачи минимизации ущерба от атмосферных выбросов промышленных предприятий // В сборнике: Компьютерные науки и информационные технологии Материалы Международной научной конференции. Ответственные за выпуск: Т.В. Семенова, А.Г. Федорова. - 2014. С. 182-184.
3. Кушникова Е.В., Резчиков А.Ф. Математическая модель для определения массового и валового выброса атмосферных поллютантов промышленного предприятия // Вестник АГТУ. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. 2015. №4. С.134 – 140.
4. Кушелева Е.В., Резчиков А.Ф., Кушников В.А. Модель для прогнозирования уровня загрязнений территорий поллютантами на основе уравнения турбулентной диффузии // Сборник трудов Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» - 2017.- Т.7. С. 111-114.
5. Кушникова Е.В., Резчиков А.Ф., Иващенко В.А., Филимонюк Л.Ю. Модели минимизации ущерба от атмосферных выбросов промышленных предприятий при неопределенности характеристик состояния окружающей среды // Экология промышленного производства. 2015. № 4 (92). С. 60-65.