

УДК 629.113:504.054:338.45

канд. техн. наук, доцент М.В. Семененко,  
Київський національний університет будівництва і архітектури**ЧИСЛЕННЫЕ И АНАЛОГОВЫЕ МОДЕЛИ В ИЗУЧЕНИИ ПРОЦЕССОВ  
РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ В ВОЗДУХЕ ГОРОДОВ**

*Проанализированы численные и аналоговые модели с точки зрения их применения в изучении распространения вредных веществ в воздухе от различных городских источников их выброса.*

Для изучения процессов распространения различных веществ в воздухе городов используются наряду с физико-математическими и эмпирически - статистическими моделями - численные и аналоговые модели.

Класс численных и аналоговых моделей является более сложным, чем гауссовы модели.

При эйлеровой формулировке задачи, рассматривается эйлерова фиксированная система координат или сетка, которая покрывает весь исследуемый район. Концентрация в каждом квадрате или ячейке сетки рассчитывается путем решения исходного уравнения численными методами. Этот подход наиболее полезен для ситуаций, в которых имеются множественные источники, и есть необходимость прогнозировать концентрации. В качестве классического примера эйлеровой модели можно привести модель LIRAQ

[1], разработанную в Ливерморской национальной лаборатории имени Лоуренса и модель Airshed [2], используемую АООС в некоторых приложениях.

При лагранжевой формулировке задачи система координат движется вместе с переносимым ветром. Этот подход полезен для единичных источников, в том числе единичных площадных источников, или для моделирования переноса примеси на большие расстояния. В таком случае не получаются концентрации на обширной сетке, как при эйлеровой задаче. Метод Лагранжа экономит машинное время, но дает результаты, которые трудно бывает интерпретировать, так как система координат искривляется. Определенная группа лагранжевых моделей, называемых траекторными моделями, избегает искривления координат при переносе единичной движущейся ячейки, но имеет другие проблемы за счет пренебрежения некоторыми деталями и упрощения процессами диффузии. Примером лагранжевой модели является применяемая АООС модель реагирующей струи, описанная Стюартом и Джеком [3].

В диссертационной работе современного исследователя Скрипник О.Я. [4] в рамках лагранжевого подхода к математическому моделированию турбулентной диффузии получены стохастические дифференциальные уравнения, которые описывают процесс, характер изменения которого во времени точно предсказать невозможно. Следует отметить, что задачу турбулентной диффузии можно рассматривать как частный случай более общей проблемы - исследования эволюции дисперсной системы.

Наиболее полным, последовательным и строгим с физической точки зрения, подходом к математическому моделированию эволюции дисперсной системы можно считать лагранжевый подход, при котором наблюдения ведутся за движением каждой из аэрозольных частичек. В этом случае, на начальном этапе моделирования сохраняется «индивидуальность» каждой частички коллектива. Если бы мы смогли сберечь эту «индивидуальность» до конечного этапа, то имели бы полную исчерпывающую информацию об эволюции дисперсной системы, в том числе информацию обо всей тонкой структуре распределения концентрации аэрозольных частичек.

Один из способов решения вышеописанной задачи, который часто встречается в смешанных методиках, называется «частица в ячейке». При этом выбросы источников делятся по разным лагранжевым ячейкам, каждая из которых движется в фиксированной системе координат. Концентрация в каждом фиксированном квадрате сетки рассчитывается путем подсчета числа ячеек в каждом квадрате. Примером применения методики «частица в ячейке» является модель ADRIS [5].

Вышеназванные модели нашли применение в исследованиях стационарных источников выброса вредных веществ в атмосферу городов. Примером использования элементов численных моделей, в современных исследованиях экологического влияния автотранспортных потоков на окружающую среду могут служить работы российских ученых Луканина В.Н., Буслаева А.П., Трофименко Ю.В., Яшиной М.В. [6].

В работе [6] математическим аппаратом исследования является теория динамических систем на регулярном клеточном разбиении территории Москвы. В этом случае распределение любого вычисляемого показателя транспортных потоков и диффузии автомобильных выбросов на территории города представляется в виде матрицы размером  $8 \times 6$ , в которой ориентация первой верхней строки соответствует северным районам города, а левый первый столбец западным.

По результатам динамического моделирования движения транспортных потоков Москвы в течение суток получена информация о состоянии транспортных потоков и концентрации загрязняющих компонент выбросов на

каждом ориентированном ребре графа  $G$ , длина ребра  $|\Delta x| \leq 300$ м, (интенсивность распределенного источника загрязнения атмосферного воздуха). Для каждого подграфа  $G_{ij}$  суммируются величины, соответствующие определенной характеристике транспортных потоков. Суммарные значения показателей, соответствующие клеточному разбиению территории, позволяют оценить предельные значения учитываемых параметров и выявить закономерности измерения характеристик влияния автотранспортных потоков на окружающую среду в терминах нагрузки на единицу площади территории.

Рассмотрим краткий алгоритм расчета количества загрязняющего вещества, выделяемого на ребре графа дорожной сети, т. е. вычисляем объем выброса от ( $i$ )-того ребра на 1км.

Используя зависимость скорости потока от плотности, находим скорость потока на  $e_i$  ребре на полосу в момент времени  $t$ :

$$v_i(t) = \min\left(v_{\max} \frac{-c_i + \sqrt{c_1 + 4c_2 \left(\frac{300n}{R_i(t)} - L\right)}}{2c_2}\right), (\text{м/с}), \quad (1)$$

переводим в (км/ч)  $v\left(\frac{i}{\tilde{n}}\right) \cdot 3,6 = v \frac{\hat{e}i}{\div}$ .

Используя зависимость пробеговых выбросов от скорости одиночного АТС, находим: [одиночное АТС на 1км].

$$m_{tox} = a_0 + a_1 v + a_2 v^2 + a_3 v^3, (\text{Г/км}), \quad (2)$$

где  $v$  – скорость транспортного потока (км/ч),

$t_{ox}$  – загрязняющая компонента.

$a_0, a_1, a_2, a_3$ , - значения коэффициентов для различных компонент отработавших газов согласно [6].

Тогда на  $e_i$  –ом ребре  $R$  одиночное АТС за 1час выделяют загрязнений по компоненте  $t_{ox}$ :

$$\dot{I}_{i, tox} = \frac{0,3v_i R_s m_i}{1000} \left(\frac{\hat{e}\tilde{a}}{\div}\right), \quad (3)$$

Что составляет на единицу площади:

$$\dot{I}_{tox,ijk} = \frac{M_i}{0,3 \cdot 0,3} \left(\frac{\hat{e}\tilde{a}}{\div \cdot \hat{e}i^2}\right),$$

Суммируется вклад каждого типа автомобильного транспортного средства с коэффициентами: легковые- 0,75, грузовые -0,2, автобусы – 0,05.

В каждом квадрате сетки разбиения области суммируется вклад всех ребер, попадающих в данный квадратик  $= F_{ijk}$ .

Задача распространения загрязнения, описываемая дифференциальным уравнением диффузии решается приближенно с помощью разностных схем. В итоге получаем сеточную функцию двух переменных (при фиксированной высоте). Т.е. в определенные моменты времени  $\{t_i\}$  измеряя  $V$  [6] представлен фрагмент матрицы концентраций  $CO$  в долях ПДК, соответствующий моменту времени:  $t=13$ ч и территории: северо-западной части Москвы. Каждый элемент матрицы соответствует концентрации  $CO$  над элементом территории с площадью  $S=350 \times 350$  м<sup>2</sup>. Затем применяется процедура выбора масштаба. Анализ полученной сеточной функции весьма сложен. Наконец сглаживание осуществляется с использованием параметрических сплайнов, процедуры, реализованной в обрабатывающих математических пакетах.

Недостаток этого метода заключается в том, что согласно вышеприведенному краткому алгоритму в определенные моменты времени  $\{t_i\}$  измеряется значения функции  $f(t_i, x_j)$  в точках  $\{x_j\}$ , и затем в соответствии с установленным алгоритмом восстанавливается зависимость  $f(t, x)$ . Очевидно, что эта функция будет содержать ошибку восстановления. Это говорит о том, что этот метод применим для ориентировочных расчетов и его нежелательно применять для транспортных потоков малых, средних и больших (до 500тис. чел.), так как погрешность результатов будет значима.

Однако метод имеет одно важное преимущество – быстроту получения результатов. Это свойство особенно актуально, когда имеем дело со сложными функциями на графе уличной дорожной сети, с задачей диффузии загрязнений, источником которой является транспортный поток.

К аналоговым моделям можно отнести интересный подход к моделированию задач природопользования, состоящий в построении теоретико-игровых моделей охраны окружающей среды, описанный академиком Г.И Марчуком [7]. Рассмотрена статистическая теоретико-игровая модель нормирования выбросов вредных веществ, задача оптимизации выбора размеров штрафов за загрязнение, задача нормирования выбросов с учетом влияния рынка, динамическая теоретико-игровая модель охраны атмосферы от загрязнения.

Физическое моделирование в аэродинамической трубе является примером аналоговой модели. В диссертационной работе [8] рассмотрена физическая и математическая постановка задачи моделирования рассеивания бенз(а)пирена с учетом жилой застройки. Автор применил метод моделирования в аэродинамической трубе, так как теплогенераторы индивидуального отопления располагаются непосредственно в зданиях потребителей или в пристроенных к

ним технологических зданиях. Значит, точки выхода дымовых газов будут располагаться по периметру застройки на разных высотах, это позволяет применить вышеназванный метод.

Преимущество аналогового метода заключается в хорошей наглядности экспериментов, а также в возможности систематического учета влияния различных факторов. Однако численная и аналоговая модель должна калиброваться результатами измерений на месте. Кроме того, при меняющейся постановке задачи зачастую нужна теоретическая и физическая проверка соблюдения аналоговых критериев и численных коэффициентов. В практике аналоговые и численные модели применяются одновременно для решений поставленных задач.

### Литература:

1. Mac-Cracken, M.C., Wuebbles, D.J., Walton, J.J., Duewer, W.H., and Grant, K.E., The Livermore Regional Air Quality Model, *Journal of Applied Meteorology* 17, 254-272(1978).
2. Reynolds, S.D., and Roth, P.M., Mathematical Modeling of Photochemical Air Pollution, *Atmospheric Environment* 7, 1033 – 1061 (1973).
3. Stewart, D., and Yocke, M.A., Users Guide to Reactive Plume Model, RPM I I, SAI Report No. EI-79-93R, Systems Applications, Inc., San Rafael, CA, 1979.
4. Скриник О.Я. Двохпараметрична параметризація вертикальної турбулентної дифузії атмосферних аерозольних домішок. Автореф. дис. канд. фіз.-мат. наук: 04.00.22 / Інститут геофізики. НАН України. – Київ. – 2005 – 21 с.
5. Lange, R., ADRIC- A Three-Dimensional Particle-in-Cell Model for the Dispersal of Atmospheric Pollutants and Its Comparison to Regional Tracers, *Journal of Applied Meteorology* 17, 320-329 (1978).
6. Луканин В.Н., Буслаев А.П., Трофименко Ю.В., Яшина М.В. Автотранспортные потоки и окружающая среда: Учеб.пособие для вузов/Под ред.В.Н.Луканина – М.: ИНФА-М., 1998.-408с.
7. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М.: Наука, 1982. – 319 с.
8. Алоян А.Е., Йорданов Д. Численная модель переноса примесей в пограничном слое атмосферы. – М.: Метеорология и гидрология, 1981. – №1. – 235 с.

### Анотація

Проаналізовані чисельні і аналогові моделі з точки зору їх використання у вивченні розповсюдження шкідливих речовин в повітрі від різних міських джерел їх викиду.

### Annotation

Numerical and analogue models from the point of view of their application in studying of distribution of harmful substances in air from various city sources of their emission are analysed.