

УДК 51.7; 519.246

Стохастичность процессов распространения примесей в воздухе и её учёт *

Клочкова Л. В., Сузан Д. В., Тишкин В. Ф.

Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН

Перед разработчиками мониторинговых интегрированных программных комплексов для экологии всегда стоят мультипликативные проблемы. С одной стороны, эти проблемы связаны с построением рациональной архитектуры системы, дающей возможность использовать достижения современных высоких технологий вычислительной техники и интернет технологий удалённого доступа. С другой стороны, стоят задачи преодоления математических трудностей при построении вычислительных алгоритмов при введении различных исходных данных, приводящих к изменению исходной дифференциальной системы уравнений физической модели процесса вплоть до изменения типа уравнений. Кроме того существует проблема управления огромным количеством данных, распределённых по различным базам. Управляющие оболочки должны выполнять каждый раз репликацию данных при вводе новых исходных данных. В разработанной системе «TIMES» существуют различные модули, которые позволяют создавать виртуальные картины различных ландшафтов местностей (слабохолмистых и с крутыми препятствиями, включая застройки крупных промышленных центров) и модели обтекания препятствий различными потоками. Исследование загрязнения окружающей среды в результате запусков ракет-носителей и при нормальной эксплуатации авиационных и космических комплексов - задача, актуальность которой является очевидной. Распространение примеси в различных слоях атмосферы происходит по различным законам. В гомогенном слое (перемешивания) примесь достаточно однородна по высоте и на высотах от 20 до 80 км практически представляет собой гомогенную смесь. В свободной атмосфере примесь распространяется на большие расстояния, практически не рассеиваясь. Примесь, выброшенная на высотах, выше тропопаузы, практически не дает следов на поверхности земли, а рассеивается глобально. Сначала были проведены расчеты распределения концентраций загрязняющих веществ в тропосфере при взлете самолётов. При расчетах величина выброса принималась равной условной величине – 1 г/с из двигателя. Расчетная концентрация измерялась в мг/м³. Расчеты проведены по модели «TIMES». Модель предназначена для расчета концентраций химически активных загрязнителей в тропосфере посредством моделирования физических и химических процессов, описываемых уравнениями диффузии-адвекции. Эти уравнения выражают массовый баланс, где учтены: эмиссия, перенос, турбулентность, химические реакции и процесс осаждения. Расчеты концентраций примеси показали, что невесомые загрязняющие вещества, выброшенные в тропосфере, перераспределяются по вертикали в зависимости от профиля коэффициента диффузии значительно медленнее, чем переносятся по ветру, т.е. по горизонтали диффузия примеси значительно больше, чем по вертикали. Однако горячие газы, истекающие из сопла двигателя, в виде облака поднимаются в атмосфере за счет сил плавучести и затем, когда температуры облака и окружающего воздуха выравниваются, распространяются в тропосфере за счет адвекции в поле ветра и диффузии в турбулентном слое перемешивания. Эффективная высота подъема выхлопных газов составляет десятки метров. Высота подъема может быть рассчитана с помощью математического моделирования

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №20-01-00578)

в случае устойчивых погодных условий, когда температура тропосферы падает с высотой. В пределах тропосферы поведение спутных следов самолётов и взлетающих ракет практически не отличаются. Построенная математическая транспортно-диффузионная модель распространения примесей на основе системы уравнений параболического типа выражает закон сохранения вещества. Перенос, изменение градиента концентраций, источники и стоки за счет физико-химических процессов в такой модели описываются как

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \operatorname{div} c \vec{w} - \operatorname{div}(K \operatorname{grad} c) + rc = Q, \quad (1)$$

где c - концентрация субстанции, K - некоторый когнитивный коэффициент, \vec{w} - поле скоростей адвекции, Q - поле эмиссии, r - коэффициент, характеризующий интенсивность источников и стоков.

Модель процессов распространения загрязнителей для многослойной расчётной области сложной конфигурации может быть выражена системой уравнений, включающей модель ветрового поля в условиях городской застройки и над местностью, имеющей слабохолмистый ландшафт

$$\begin{cases} \frac{\partial c}{\partial t} + \operatorname{div} c \vec{w} - \operatorname{div}(K \operatorname{grad} c) - \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial c}{\partial z} + rc = Q, z > h_t(x, y) \\ c = 0, z \leq h_t(x, y), \end{cases} \quad (2)$$

где c - концентрация субстанции, K - коэффициент горизонтальной турбулентности, K_z - коэффициент вертикальной турбулентности, \vec{w} - скорость ветра, Q - поле эмиссии, r - коэффициент, характеризующий интенсивность распада вещества, $h_t(x, y)$ - кусочно-непрерывная функция, которая описывает рельеф области, причем $h_t(x, y) = h_b$ если точка $(x, y, 0)$ принадлежит основанию возвышения высотой h_b . Однако существует большое число примеров рядов данных, требующих для своего описания подходов, учитывающих нелинейные и нестационарные свойства окружающей среды. В работе основной акцент делается на обоснование применимости методов математического прогнозирования для стохастических процессов. Задача прогнозирования ряда с определенной точностью на заданный горизонт возникает во многих практических приложениях. Такие модели предлагается использовать для прогнозирования загрязненности атмосферы мегаполисов, а также распространения инфекций или вредных примесей в случайно-неоднородной и нестационарной среде. Актуальность кинетических моделей для описания эволюции распределения случайных параметров, характеризующих интенсивность источника вредных примесей, состоит в следующем. Для таких задач общепринятым подходом является использование уравнений химической кинетики, описывающих эволюцию примесей, их состав и концентрацию в химически активном газе в определенных температурных и конвективных условиях внешней среды. Однако одновременно предлагается использовать уравнений такого типа для конкретных процессов с учётом того, что источник загрязнения по интенсивности и составу является случайным и притом нестационарным. В результате кинетические уравнения, применяемые в условиях неопределенности пространственного распределения примесей, приобретают дополнительные стохастические свойства из-за неопределенности функции источника. Возможность описать эту неопределенность кинетическим уравнением того же типа, что и среду, в которой осуществляется перенос изучаемого фактора, позволяет построить унифицированную кинетическую модель процесса в целом.

MSC2020 76R50

Stochasticity of contaminations spread processes in the air and its record

L. V. Klochkova , D. V. Suzan, V. F. Tishkin

Keldysh Institute of Applied Mathematics