

И.П. Каменева, к.т.н., А.А. Попов, м.н.с.,  
ИПМЭ им. Г.Е. Пухова НАН Украины  
(Украина, 03164, Киев, ул. Генерала Наумова, 15,  
тел. (044) 4249168; E-mail: lab7@ukr.net)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ НАГРУЗОК НА АТМОСФЕРУ ГОРОДА ОТ ПРЕДПРИЯТИЙ ТЭК С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ**

A complex approach is offered to the estimation of potential danger of objects of fuel and energy complex which allows to build the estimations of ecological risk taking into account the results of stochastic modeling of atmospheric processes in the zone of influence of potentially dangerous objects. The computer system of prognostication of dangerous situations is developed with visual presentation of results of modeling as ecological cards. Refs: 13 titles.

*Key words:* anthropogenic loads, mathematical models, statistical modification, risk, the computer system, GIS technology.

### **Введение**

Современный уровень экологической безопасности Украины, к сожалению, пока еще не соответствует международным требованиям, что обусловлено чрезмерными техногенными нагрузками на природную среду, нерациональным размещением предприятий энергетической отрасли, применением устаревших технологий. К наиболее опасным в экологическом отношении объектам следует отнести тепловые и атомные электростанции, водохранилища, нефтепроводы и газопроводы, а также накопители промышленных и бытовых отходов. Решение множества экологических проблем, накопившихся за последние десятилетия, связывается с разработкой национальной стратегии приоритетных по эколого-экономическим критериям мероприятий, которые базируются на оценках экологического риска [1-3].

Для комплексной оценки состояния атмосферы и выявления территорий повышенного риска по атмосферному фактору необходимо рассмотреть ряд достаточно сложных задач, связанных с моделированием зоны влияния техногенных объектов при неблагоприятных погодных условиях. Этот комплекс задач решается на основе анализа данных мониторинга и компьютерного моделирования техногенных нагрузок, связанных с функционированием потенциально опасных объектов (ПОО). В качестве ПОО может рассматриваться любой промышленный объект, ориентированный на выработку, переработку или использование топливно-энергетических ресурсов.

Для прогнозирования и своевременного предупреждения наиболее опасных ситуаций необходимо оценить уровень техногенных нагрузок на

атмосферу города (региона) от деятельности одного или нескольких ПОО с учетом метеорологических факторов, особенностей застройки и рельефа. Исследование влияния этих факторов связано с развитием и усовершенствованием математических моделей процессов переноса загрязняющих веществ, поступающих в атмосферу от выбросов ПОО. В результате моделирования можно построить пространственное распределение концентраций наиболее опасных веществ в зоне влияния одного или нескольких ПОО и оценить уровень экологического риска для населения прилегающих территорий.

Большинство известных математических моделей атмосферных процессов не учитывает вероятностный характер факторов риска и распределение метеорологических условий во времени. Внимание исследователей в этой области сосредоточено главным образом на математических методах решения уравнений турбулентной диффузии [4 - 6]. Значительно реже предлагаются модели техногенных нагрузок от выбросов конкретных предприятий с оценкой их влияния на население [7, 8]. Как правило, математические модели атмосферных процессов исследуются на теоретическом уровне, без привязки к конкретным территориям и оценки вредных воздействий на население.

Полученные на теоретическом уровне модели и решения требуют достаточно сложной адаптации и настройки для использования в задачах мониторинга конкретных источников выбросов. Кроме того, для принятия решений результаты моделирования удобно анализировать не в виде абстрактных оценок, а как пространственное распределение техногенных нагрузок и рисков, т.е. в виде электронных экологических карт, полученных с применением современных *ГИС-технологий*.

### **Постановка задачи**

В данной работе рассматривается комплексный подход к решению задач мониторинга ПОО, который включает статистическое моделирование техногенных нагрузок от выбросов стационарных источников на основе известных методов, компьютерные средства исследования распределения примесей для конкретных территорий (на примере выбросов предприятий ТЭК), разработку ГИС-технологий пространственного анализа техногенных нагрузок и рисков для населения.

Оценка ПОО по указанным экологическим критериям обеспечивает возможность перейти к задаче принятия обоснованных управленческих решений, связанных с выбором более эффективных режимов эксплуатации этих объектов, поиском подходящих территорий для проектирования новых предприятий, решением вопросов ликвидации или реконструкции тех ПОО, которые не соответствуют экологическим нормам. На стадиях принятия решений допустимый экологический риск оценивается на уровне государственной экологической экспертизы (с учетом международных нормативных документов), чтобы в случаях его превышения воспользоваться методами

экономического и правового регулирования деятельности соответствующих предприятий.

### Статистическое представление математических моделей

На современном этапе для математического моделирования распространения загрязнения в атмосфере используются два основных подхода: решение уравнения турбулентной диффузии и эмпирико-статистический подход, который базируется на использовании интерполирующих моделей (в основном – гауссовского типа) [7]. Более широкое распространение в настоящее время получил второй подход, который оказался более простым и удобным для компьютерной реализации.

Детерминированные модели достаточно удобны для анализа техногенных нагрузок, связанных с кратковременным воздействием неблагоприятных факторов. Однако для анализа более длительных воздействий следует воспользоваться статистическим подходом к построению математических моделей, учитывающим распределение метеорологических характеристик во времени [8].

Рассматриваемый в данной работе подход основан на использовании формулы, постулирующей полную вероятность всех возможных событий. В качестве событий в данном случае используется множество метеорологических ситуаций, где каждая из возможных ситуаций имеет определенную продолжительность во времени  $t_i$ .

Считая время переходных процессов незначительным, сначала записываем концентрации, связанные с одним направлением ветра, а затем суммируем все значения концентраций, полученные за требуемый период

$$T = \sum_{i=1}^n t_i :$$

$$C_{\text{сеп}} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} = \frac{C_1 t_1 + C_2 t_2 + \dots + C_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n},$$

где  $C_i$  – значения концентраций химических веществ, полученные для каждой из исследуемых метеорологических ситуаций продолжительностью  $t_i$ .

Приведа эту формулу к вероятностному виду, получим следующее выражение:

$$C_{\text{сеп}} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} = C_1 \frac{t_1}{T} + \dots + C_n \frac{t_n}{T} = C_1 P_1 + \dots + C_n P_n = \sum_{i=1}^n C_i P_i \quad (1)$$

где  $p_i$  – повторяемость или вероятность  $i$ -ой метеорологической ситуации. Формула (1) определяет статистическую модель в наиболее общем виде [9, 10].

Чтобы определить среднюю концентрацию вредных примесей на исследуемой территории за длительный период (месяц, год), необходимо получить метеорологические данные за этот период. Напомним, что каждая метеорологическая ситуация определяется направлением и скоростью ветра, состоянием атмосферы и количеством осадков.

Метеорологические службы ежедневно определяют среднесуточное направление и среднюю скорость ветра. Однако в розе ветров обычно учтено только восемь основных направлений. Для более точного определения распределения концентрации загрязнения за достаточно длительный период времени  $T$  (месяц, год) необходимо учесть вероятности промежуточных направлений и скоростей ветра, которые наблюдались на протяжении рассматриваемого периода, т.е. определить относительную повторяемость скоростей ветра для  $n$  промежуточных направлений.

Чтобы построить розу ветров для  $n$  промежуточных направлений, использовались результаты работы [10], где описан достаточно простой алгоритм интерполяции промежуточных вероятностей, основанный на методах аналитической геометрии.

Рассмотрим статистическое представление формулы (1) в развернутом виде, с учетом вероятностей промежуточных состояний:

$$C_{cep}(x, y) = \sum_{m=1} \sum_{n,j=1,k} P_{mj} \sum_{i=1,6} p_{ji} C_{D_{m,ji}}(x, y, f) + C_{шт}(x, y) P_{шт}, \quad (2)$$

где  $p_{ji}$  – вероятность  $i$ -го состояния атмосферы при  $j$ -ой скорости ветра;  $P_{mj}$  – вероятность  $m$ -го направления ветра при  $j$ -ой скорости ветра;  $m$  – индекс направления ветра;  $j$  – индекс скорости ветра;  $i$  – индекс класса устойчивости атмосферы;  $C_D$  – концентрация для определенной метеорологической ситуации, определенная с помощью детерминированной модели;  $C_{шт}$ ,  $P_{шт}$  – модель определения концентрации при условии штиля и вероятность штиля соответственно.

### Статистическая модификация модели МАГАТЭ

Покажем более детально отдельные этапы построения развернутой статистической модели на примере модели МАГАТЭ. Подчеркнем, что аналогичные преобразования можно получить и для моделей, основанных на уравнении турбулентной диффузии.

В общем случае модель МАГАТЭ имеет вид:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{\sigma_y^2}\right] \left\{ \exp\left[-\frac{(z - H_{эф})^2}{\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z + H_{эф})^2}{\sigma_z^2}\right] \right\} f_{вз.вр.ср} \quad (3)$$

где  $Q$  – мощность непрерывного источника, [г/с];  $u$  – скорость ветра на высоте  $H_{эф}$ , [м/с];  $\sigma_y(x)$  – горизонтальная дисперсия, [м];  $\sigma_z(x)$  – вертикальная

дисперсия, [м];  $H_{эф}$  – конечный подъем шлейфа над землей (эффективная высота подъема шлейфа), [м];  $f_{вз.вн.ср} = \prod_{i=1}^n f_i$ , где  $f_i$  – поправка на уменьшение концентрации загрязнения за счет влияния  $i$ -го фактора (вымывание осадками, химическая трансформация, поглощение подстилающей поверхностью и т.д.).

Сначала запишем уравнение (3) в вероятностном виде для случая распространения примесей при определенном направлении и скорости ветра. Пусть это будет восточный ветер со скоростью  $u_1 = 1,5$  м/с. Поэтому, учитывая вероятностное распределение стратификации атмосферы, модель можно представить в следующем виде:

$$C(x, y) = \frac{Q}{\pi} P_{11} \sum_{i=1}^6 P_{1i} \frac{1}{u_{1i} \sigma_{y_i} \sigma_{z_i}} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_{y_i}^2}\right] \cdot \exp\left[-\frac{H_{эф1}^2}{2\sigma_{z_i}^2}\right] \cdot f_{вз.вн.ср} \quad (4)$$

где  $P_{11}$  – вероятность восточного направления ветра при скорости  $u_1 = 1,5$  м/с;  $P_{1i}$  – вероятности соответствующих состояний атмосферы при скорости ветра  $u_1 = 1,5$  м/с;  $u_{1j}$  – скорости ветра на высоте устья трубы при скорости ветра на высоте флюгера  $u_1 = 1,5$  м/с;  $\sigma_{y_i}, \sigma_{z_i}$  – соответственно горизонтальная и вертикальная дисперсии  $i$ -ой стратификации атмосферы.

Далее, просуммировав (4) по разным скоростям ветра, получим:

$$C(x, y) = \frac{Q}{\pi} \sum_{j=1}^k P_{1j} \sum_{i=1}^6 P_{ji} \frac{1}{u_{ji} \sigma_{y_i} \sigma_{z_i}} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_{y_i}^2}\right] \cdot \exp\left[-\frac{H_{эфj}^2}{2\sigma_{z_i}^2}\right] \cdot f_{вз.вн.ср} \quad (5)$$

Выражение (5) можно рассматривать как статистическую модель рассеивания загрязнения для определенного направления ветра (восточного).

Чтобы записать статистическое представление модели (3) в завершеном виде, необходимо просуммировать (5) по всем возможным направлениям ветра, с учетом ситуаций, связанных со штилем, а также взаимодействия выбросов с внешней средой [10]:

$$\begin{aligned} C_{ср} = C_M(x, y) = & \frac{Q}{\pi} \left( \sum_{m=1}^n \sum_{j=1}^k P_{mj} \sum_{i=1}^6 P_{ji} \frac{1}{u_{ji} \sigma_{y_i} \sigma_{z_i}} \exp\left[-\frac{y_m^2}{2\sigma_{y_i}^2}\right] \cdot \exp\left[-\frac{H_{эфj}^2}{2\sigma_{z_i}^2}\right] \right) \times \\ & \times \exp\left[-\frac{\alpha x_m}{u_{ji}}\right] + P_{шт} \sum_{m=1}^n \sum_{j=1}^k P_{mj} \sum_{i=1}^6 P_{ji} \frac{1}{u_{ji(H_{эф}-L)} \sigma_{y_i} \sigma_{z_i}} \exp\left[-\frac{y_m^2}{2\sigma_{y_i}^2}\right] \times \\ & \times \exp\left[-\frac{(H_{эфj} - L)^2}{2\sigma_{z_i}^2}\right] \cdot \exp\left[-\frac{\alpha x_m}{u_{ji(H_{эф}-L)}}\right], \end{aligned} \quad (6)$$

где  $u_{ji}$  – скорость ветра на эффективной высоте факела выбросов  $H_{эф}$  при скорости ветра на высоте флюгера  $u_j$  [м/с] для  $i$ -го состояния атмосферы;  $H_{эф_j}$  – эффективная высота подъема факела выбросов при  $j$ -ой скорости ветра, [М];  $u_{ji(H_{эф}-L)}$  – скорость ветра на высоте  $H_{эф} - L$  при скорости ветра на высоте флюгера  $u_j$  [м/с] для  $i$ -го состояния атмосферы;  $\sigma_{y_i}$ ,  $\sigma_{z_i}$  – соответственно горизонтальная и вертикальная дисперсии  $i$ -ой стратификации атмосферы;  $x_m(x, y, \varphi_m) = x \cos \varphi_m + y \sin \varphi_m$ ,  $y_m(x, y, \varphi_m) = -x \sin \varphi_m + y \cos \varphi_m$  – формулы перехода к другой системе координат связанной с поворотом направления распространения загрязняющих веществ на угол  $\varphi_m$  по отношению к восточному направлению;  $L$  – высота штилевого слоя, [м].

Аналогичным образом была получена статистическая модификация К-модели Робертса [13].

Полученные таким образом модификации были использованы для статистического моделирования пространственного распределения техногенных нагрузок от выбросов стационарных точечных источников за длительный период времени (месяц, год) на примере воздействия выбросов ТЕЦ на территорию города Киева.

В качестве входных данных для моделирования процесса переноса загрязняющих веществ использовались следующие характеристики: скорость и направление ветра (роза ветров для данного региона); параметры, которые характеризуют стратификацию атмосферы [8]; количественные характеристики для источников выбросов загрязняющих веществ; характеристики качественного состава выбросов; картографические данные по расположению источников выбросов и прилегающим территориям.

Проблема уточнения всех необходимых параметров для адаптации модели (6) к условиям города Киева более детально рассматривается в работе [10].

### **Компьютерная система моделирования опасных ситуаций**

Для компьютерной реализации поставленных задач разработана автономная информационно-компьютерная система, модульная структура которой представлена на рис. 1.

Слева показаны модули, обеспечивающие работу с данными, включая собственно базу данных и средства, необходимые для просмотра и визуализации информации, которая в ней хранится. В базе данных содержится информация о потенциально опасных предприятиях, которые вносят наиболее существенный вклад в загрязнение атмосферы. В частности, база данных включает сведения об объектах топливной энергетики, представляющих максимальную опасность для населения среди стационарных источников загрязнения атмосферы.

Данные подразделяются на пять категорий: картографические данные

(карты исследуемых территорий), характеристики предприятий ТЭК, параметры выбросов, метеорологические данные, информация о химических веществах.

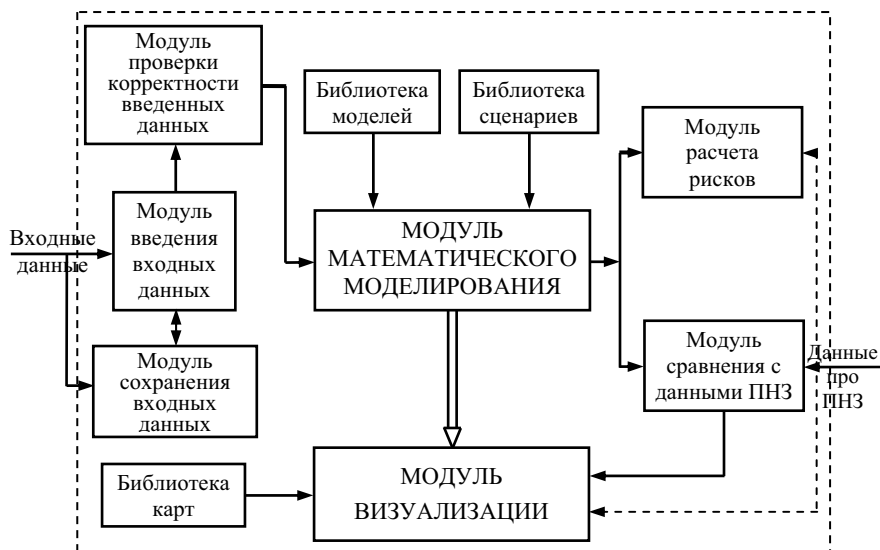


Рис. 1. Модульная структура компьютерной системы.  
(ПНЗ – стационарные посты наблюдения за загрязнением)

Центральный модуль включает комплекс математических и численных моделей, с помощью которых производятся вычисления, необходимые для прогнозирования техногенных нагрузок при разных метеорологических условиях и сценариях выбросов. Для математического моделирования техногенных нагрузок за длительный период предлагается описанная выше статистическая модификация известных моделей, где концентрации вредных примесей могут быть определены известными методами (как с помощью модели МАГАТЭ, так и на основе уравнения турбулентной диффузии).

Модуль визуализации обеспечивает пространственное представление численных результатов моделирования в виде электронных карт техногенных нагрузок и карт рисков [11, 12]. Картографическая интерпретация математических расчетов приводит их к виду, наиболее удобному для использования в системах принятия решений, и в то же время служит инструментом пространственного анализа и содержательной интерпретации результатов математического моделирования для конкретных территорий.

По картам можно легко определить недостатки используемых математических моделей, найти отдельные погрешности, вызванные ошибками моделирования, оценить полученную картину в целом и выявить

территории повышенного риска.

Разработанная система включает также модуль расчета рисков. Он дает возможность получить количественную оценку негативного воздействия техногенных загрязнений атмосферы на здоровье населения, которое проживает в зоне влияния предприятий ТЭК. Вредное воздействие может реализоваться в форме немедленных токсических эффектов или хронических заболеваний. Для оценки риска токсических эффектов используется модель индивидуальных порогов воздействия [3].

Предложены также программные средства для перехода от пространственного распределения уровней техногенных нагрузок к распределению индивидуальных и коллективных рисков. Таким образом, компьютерное моделирование завершается оценкой техногенных рисков, которые рекомендуется использовать в качестве основных критериев для принятия управленческих решений.

Разработанные программные средства использовались для моделирования наиболее опасных сценариев загрязнения атмосферы города Киева выбросами тепловых электростанций (на примере ТЭЦ-5 и других предприятий ТЭК). Результаты анализа представлены в виде экологических карт техногенных нагрузок на приземный слой атмосферы и карт риска.

Для проверки адекватности разработанных программных средств значения концентраций, полученные в результате моделирования, сопоставлялись с данными натурных измерений, которые проводились на постах наблюдения за состоянием приземного слоя атмосферы г. Киева. Чтобы нейтрализовать влияние транспорта, для сравнения были выбраны посты наблюдения, расположенные в зеленой зоне. Сравнительный анализ показал, что результаты компьютерного моделирования с достаточно высокой точностью совпадают с измеренными концентрациями, что подтверждает адекватность предложенного подхода.

### **Выводы**

Рассматривается статистический подход к моделированию техногенных нагрузок на атмосферу и атмосферных рисков, который учитывает вероятностное распределение метеорологических ситуаций за фиксированный период времени. На основе общей формулы полной вероятности построена статистическая модификация модели МАГАТЕ, которая использовалась для моделирования техногенных нагрузок от выбросов конкретных предприятий за длительный период времени.

Разработана компьютерная система, которая обеспечивает информационную поддержку при решении актуальных задач охраны окружающей среды, связанных с регулированием выбросов в атмосферу от стационарных источников. Предложенные программные средства позволяют определить уровни техногенных нагрузок и риски для населения при изменении режимов работы ПОО, использовании альтернативных видов топлива, с учетом метеорологических данных и особенностей конкретного региона.



1. Методика визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування об'єктів підвищеної небезпеки – К.: Основа, 2003. – 192 с.
2. Управление риском: Риск. Устойчивое развитие. Синергетика. – М.: Наука, 2000. – 431 с.
3. *Альмов В.Т.* Техногенный риск: Анализ и оценка : [учебное пособие для вузов] / *В.Т. Альмов, Н.П. Тарасова.* – М. : ИКЦ «Академкнига», 2004. – 118 с.
4. *Берлянд М.Е.* Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы / *М.Е. Берлянд.* – Л. : Гидрометеоиздат, 1975. – 448 с.
5. *Степаненко С.Н.* Динамика турбулентно-циркуляционных и диффузионных процессов в нижнем слое атмосферы / *С.Н. Степаненко.* – Одесса : Маяк, 1998. – 288 с.
6. *Прусов В.А.* Моделювання природних і техногенних процесів в атмосфері / *В.А. Прусов, А.Ю. Дорошенко.* – К., Наукова думка, 2006. – 542 с.
7. *Попов О.О.* Математичне моделювання розповсюдження техногенного забруднення від підприємств паливної енергетики / *О.О Попов* // Моделювання та інформаційні технології: зб. наук. пр. – К. : ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2009. – № 51. – С. 73-84.
8. *Швыряев А.А.* Оценка риска воздействия загрязнения атмосферы в исследуемом регионе : [учебное пособие для вузов] / *А.А. Швыряев, В.В. Менишков.* – М. : Изд-во МГУ, 2004. – 124 с.
9. *Марчук Г.И.* Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / *Г.И. Марчук.* – М. : Наука, 1982. – 320 с.
10. *Попов О.О.* Стохастична модель забруднення приземної атмосфери від підприємств паливної енергетики (на прикладі ТЕЦ) / *О.О. Попов* // Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. – К. – 2009. – Вип. 53. – С. 10–21.
11. *Каменева И.П.* ГИС-технологии построения экологических карт статистических поверхностей / *И.П. Каменева, А.В. Яцишин, А.А. Попов, Т.В. Бахурец* // Моделювання та інформаційні технології: зб. наук. пр. – К.: ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2009. – № 49. – С. 81-88.
12. *Каменева И.П.* Комплексний аналіз екологічної безпеки міста на основі сучасних ГІС-технологій / *И.П. Каменева, А.В. Яцишин, Д.О. Полішко, О.О. Попов* // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності, 2008. - № 5, С. 41-46.
13. *Попов О.О.* Математичне та комп'ютерне моделювання техногенних навантажень на атмосферу міста від стаціонарних точкових джерел забруднення : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 01.05.02 “Математичне моделювання та обчислювальні методи” / *О.О. Попов.* – К., 2010. – 20 с.

*Поступила 21.03.2011р.*