

# СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ОБУЧАЮЩИЕ СИСТЕМЫ

---

УДК 004.021

**В. Л. Колесников, А. И. Бракович, Я. А. Жук**

Белорусский государственный технологический университет

## **КОНСТРУИРОВАНИЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЕРРИТОРИЙ**

Данная работа дополняет известные методы математического моделирования атмосферных процессов, позволяет вычислить степень адекватности получаемых моделей и основана на проведении натурных испытаний. Границы экспертируемых территорий составляют 10–20 км. Источником информации служат накопленные результаты замеров концентрации загрязняющих веществ, осуществляемых как стационарными, так и передвижными лабораториями за произвольный отрезок времени.

Для решения перечисленных задач разработано программное средство для конструирования и визуализации разновидностей стохастических математических моделей, описывающих загрязнение окружающей среды, путем подбора линеаризующих преобразующих соответствий.

В качестве программной платформы использовался .NET Framework, что позволило в сжатые сроки реализовать удобный графический интерфейс пользователя на основе таблиц DataGridView, панелей рисунков PictureBox для визуализации моделей, экземпляров собственного элемента управления каждым фактором, упорядоченных при помощи FlowLayoutPanel, диалоговых окон, кнопок, меню и вкладок. Важной частью функционала программного средства является возможность загрузки исходных данных из электронных таблиц Excel при помощи пакета Microsoft.Office.Interop.Excel.

**Ключевые слова:** загрязнение территорий, моделирование загрязнения атмосферы, программное средство, стохастические математические модели.

**V. L. Kolesnikov, A. I. Brakovich, Ya. A. Zhuk**

Belarusian State Technological University

## **THE ENGINEERING AND VISUALIZATION OF STOCHASTIC MODELS OF THE CONTAMINATED TERRITORIES**

This work complements the well-known methods of mathematical modeling of atmospheric processes, allows to calculate the degree of adequacy of the resulting models and is based on full-scale trials. The expertized border areas account for 10–20 km. The source of information are the accumulated results of measurements of concentration of pollutants, both at stationary and mobile laboratories for an arbitrary period of time.

To solve these problems a software tool for the design and visualization of varieties of stochastic mathematical models describing environmental pollution, by selecting linearizing converted conformities was developed.

As a software platform used .NET Framework, which made it possible to quickly implement a user-friendly graphical interface based on DataGridView tables, panel drawings PictureBox to visualize models, copies of their own control of every factor ordered using FlowLayoutPanel, dialog boxes, buttons, menus, and tabs. An important part of the functional software tool is the ability to download raw data from Excel spreadsheets using the package Microsoft.Office.Interop.Excel.

**Key words:** land contamination, air pollution modeling, software tool, stochastic mathematical models.

**Введение.** В настоящее время основой для моделирования загрязнения приземных слоев атмосферы является расчет распространения примесей в атмосферном воздухе от источника загрязнения с учетом параметров источника и окружающей среды. Процесс распространения промышленных выбросов в атмосфере проис-

ходит вследствие их адвентивного перенесения воздушными массами и диффузии, которая сопровождается турбулентными пульсациями воздуха. Для изучения этого процесса используются зависимости Гаусса, Лагранжа и Эйлера [1]. Увеличение и снижение содержания конкретного загрязняющего вещества необходимо оп-

ределять в каждой точке воображаемой пространственной сетки и за отдельные промежутки времени. Поскольку такой метод очень сложен, им обычно нельзя пользоваться постоянно. Однако во многих случаях он может быть упрощен при следующих условиях:

- неизменность условий выделения загрязняющих веществ со временем;
- неизменность метеорологических условий во время переноса;
- скорость ветра менее 1 м/с.

В этом случае моделирование можно свести к уравнению, которое может быть решено аналитически. В результате выводится формула, которая описывает шлейф (перо) с гауссовым распределением концентрации – так называемую гауссову перьевую модель (VDI). Параметры распределения зависят от метеорологических условий и расстояния в направлении ветра, а также от высоты дымовой трубы:

$$C = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{(x-ut)^2}{2\sigma_x^2}} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \times e^{-\left[ \frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2} + e^{-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}} \right]}, \quad (1)$$

где  $u$  – скорость ветра на высоте  $H$ , м/с;  $\sigma$  – направление ветра, выраженное через угол наклона к базовой системе координат.

Следует иметь в виду, что указанные вероятностные законы упрощены: например, без какого-либо обоснования утверждается, что величины обладают нормальным или равномерным распределением. Поэтому моделирование, основанное на уравнении (1), на практике дополнительно включает в себя модули корректирующих эмпирических зависимостей, позволяющих давать более реалистичную оценку.

Современные методы математического моделирования атмосферных процессов дают возможность рассчитать на основе статистических данных об объемах выбросов загрязняющих веществ в контрольных точках и построить изолинейные карты распределения концентраций загрязняющих веществ. Основной областью применения расчетных методов является нормирование выбросов на уровне предприятий, но это не исключает их применения и при решении научных задач, связанных с оценкой экологической обстановки в пределах больших территорий. При расчете предельно допустимых выбросов (ПДВ) предприятий используются специальные расчетные методики, учитывающие параметры каждого источника загрязнения, климатические условия, характер под-

стилающей поверхности. Наиболее известными являются: методика ОНД 86 [2]; уравнение турбулентной диффузии Гаусса и его многочисленные модификации.

Описанные методы моделирования загрязнения атмосферы, основанные на расчетах диффузионного и турбулентного рассеивания выбросов вредных веществ из устья точечного источника, оценивают экологическую ситуацию на больших расстояниях от источника и на больших площадях загрязненных территорий. Кроме того, такие модели нельзя проверить на адекватность, поскольку отсутствует дисперсия воспроизводимости.

Наша работа расширяет и дополняет описанную методологию, позволяет вычислить степень адекватности получаемых моделей и основана на проведении натуральных испытаний. Границы экспертируемых территорий составляют 10–20 км. Источником информации служат накопленные результаты замеров концентрации загрязняющих веществ, осуществляемых как стационарными, так и передвижными лабораториями за произвольный отрезок времени.

**Основная часть.** Имеется таблично заданная функция в виде зафиксированных условий рассеивания примесей и результатов измерения загрязнений, которую нужно аппроксимировать наиболее подходящей функцией при условии минимума энтропии параметров модели.

Решая задачу выбора класса аппроксимирующей функции, необходимо соблюдать следующие требования:

- 1) простота функции (в смысле математических операций и реализации на ЭВМ);
- 2) достаточная точность (ошибка аппроксимации должна быть одного порядка с разбросом параметров характеристик отдельных реализаций в ансамбле реализаций);
- 3) наглядность, позволяющая судить об изменении коэффициентов аппроксимации при изменении характеристик процесса;
- 4) ясность понимания процессов в явлении и выявление свойств и характеристик, представляющих интерес в конкретном случае.

Таким образом, функцию, аппроксимирующую какую-либо характеристику, выбирают либо исходя из физических представлений об изучаемом процессе, либо чисто формально, основываясь на внешнем сходстве характеристики с графическим изображением той или иной функции. При решении задачи аппроксимации так же, как и при решении любой задачи, связанной с выбором расчетной модели, необходимо идти на компромисс между точностью и сложностью модели.

В качестве аппроксимирующей функции часто применяется ее разложение в ряд Тейлора.

Пусть функция  $f(x, y)$  имеет полные производные вплоть до  $n$ -го порядка включительно в некоторой окрестности точки  $(x_0, y_0)$ . Введем дифференциальный оператор:

$$T = (x - x_0) \frac{\partial}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial}{\partial y}. \quad (2)$$

Тогда разложением в ряд Тейлора функции  $f(x, y)$  по степеням  $(x - x_0)^k$  и  $(y - y_0)^k$  в окрестности точки  $(x_0, y_0)$  будет:

$$f(x, y) = \sum_{k=0}^n \frac{T^k f(x_0, y_0)}{k!} + \frac{T^{(n+1)} f(\xi, \zeta)}{(n+1)!}, \quad (3)$$

$$\xi \in [x_0, x], \quad \zeta \in [y_0, y].$$

Если оставить только главные эффекты и парные произведения факторов, то (3) преобразуется в полиномы степени  $k$ , называемые многомерными степенными рядами общего вида:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^m b_i x_i + \sum_{i,j=1, i \neq j}^m b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^m b_{ii} x_i x_i + \dots \quad (4)$$

Геометрическим образом уравнения (4) является некоторая поверхность в  $m$ -мерном пространстве, называемая поверхностью отклика, а само уравнение (4) соответственно называется функцией отклика. Если число заданных точек превышает число определяемых коэффициентов аппроксимации, то можно использовать метод наименьших квадратов, при котором среднеквадратичная ошибка минимальна. Метод наименьших квадратов применяется, когда необходима высокая точность аппроксимации, требует громоздких вычислений, но имеет конструктивный подход для аналитического определения коэффициентов модели.

Если число заданных точек превышает число определяемых коэффициентов аппроксимации, то можно использовать метод наименьших квадратов, при котором среднеквадратичная ошибка минимальна. Метод применяется, когда необходима высокая точность аппроксимации, требует больших вычислений, но имеет конструктивный подход для аналитического определения коэффициентов модели. Минимизация функционала (5) позволяет получить линейные оценки коэффициентов полиномиальных стохастических моделей:

$$F = \sum_{i=1}^n (b_0 + b_1 x_i + b_2 x_i^2 - \bar{y}_i)^2 \rightarrow \min. \quad (5)$$

Адекватности модели можно добиваться увеличением степени аппроксимирующего полинома, применяя прием линеаризации.

Сущность линеаризации заключается во введении в таблично заданную функцию псевдофакторов, построчные значения которых получаются комбинацией известных значений независимых переменных. В [1] представлены стандартные выражения и графики основных линеаризующих функций, комбинируя которые в одной формуле, можно конструировать стохастические модели и получать максимальную степень их адекватности, приняв за дисперсию воспроизводимости характеристики измерительных приборов. Возможности линеаризации не исчерпываются стандартными выражениями. Дополнительно можно использовать пробные линеаризующие соответствия:

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= \frac{x_1}{x_2}; & x_{n+1} &= (x_1 - x_2)^2; \\ x_{n+1} &= \frac{(x_1 - x_2)^2}{(x_1 + x_2)^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Весьма востребованной для моделирования загрязнения атмосферы может быть комбинированная логистическая сигмоидная модель вида:

$$y = A_{\text{нижн}} + \frac{(A_{\text{верх}} - A_{\text{нижн}}) e^{y^*}}{1 + e^{y^*}}, \quad (7)$$

где  $y^* = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , которая аппроксимирует данные по кривой, проходящей между двумя неподвижными асимптотами, и получается путем линеаризации:

$$y_i = \ln \left( \frac{y_i - A_{\text{нижн}}}{A_{\text{верх}} - y_i} \right). \quad (8)$$

Привлекательность этой модели заключается также в том, что рассчитанные по модели значения не могут оказаться вне диапазона, обозначенного асимптотами, например, степень очистки не может быть больше 100%, концентрация примесей не может быть меньше нуля.

Можно выделить следующие наиболее типичные классы задач экологического анализа хозяйственной деятельности, для решения которых применяются методы стохастического моделирования:

- изучение наличия, направления и интенсивности связей экологической ситуации территории с показателями хозяйственной деятельности предприятия;
- ранжирование и классификация факторов промышленной экологии;
- нахождение общих закономерностей функционирования объекта.

Для решения перечисленных задач разработано программное средство для конструирования и визуализации разномодельности стохастических

математических моделей, описывающих загрязнение окружающей среды, путем подбора линеаризующих преобразующих соответствий (рис. 1). В качестве программной платформы использовался .NET Framework, что позволило в сжатые сроки реализовать удобный графический интерфейс пользователя на основе таблиц DataGridView, панелей рисунков PictureBox для визуализации моделей, экземпляров собственного элемента управления каждым фактором, упорядоченных при помощи FlowLayoutPanel, диалоговых окон, кнопок, меню и вкладок. Важной частью функционала программного средства

является возможность загрузки исходных данных из электронных таблиц Excel при помощи пакета Microsoft.Office.Interop.Excel.

Вводя псевдофакторы в таблично заданную функцию, можно увеличивать размерность расширенной матрицы и, не меняя методики вычислений коэффициентов полиномиальных моделей, можно получать и визуализировать нелинейные, достаточно многообразные и сложные математические описания объектов (рис. 2). Отличительной особенностью программного средства является формирование набора псевдофакторов самим пользователем.

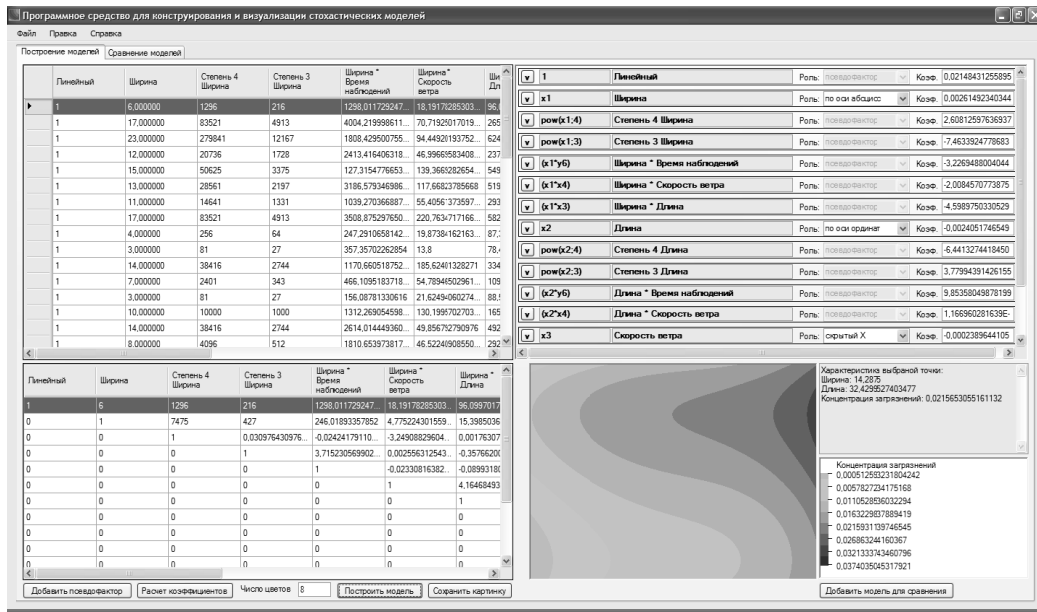


Рис. 1. Интерфейс разработанного программного средства

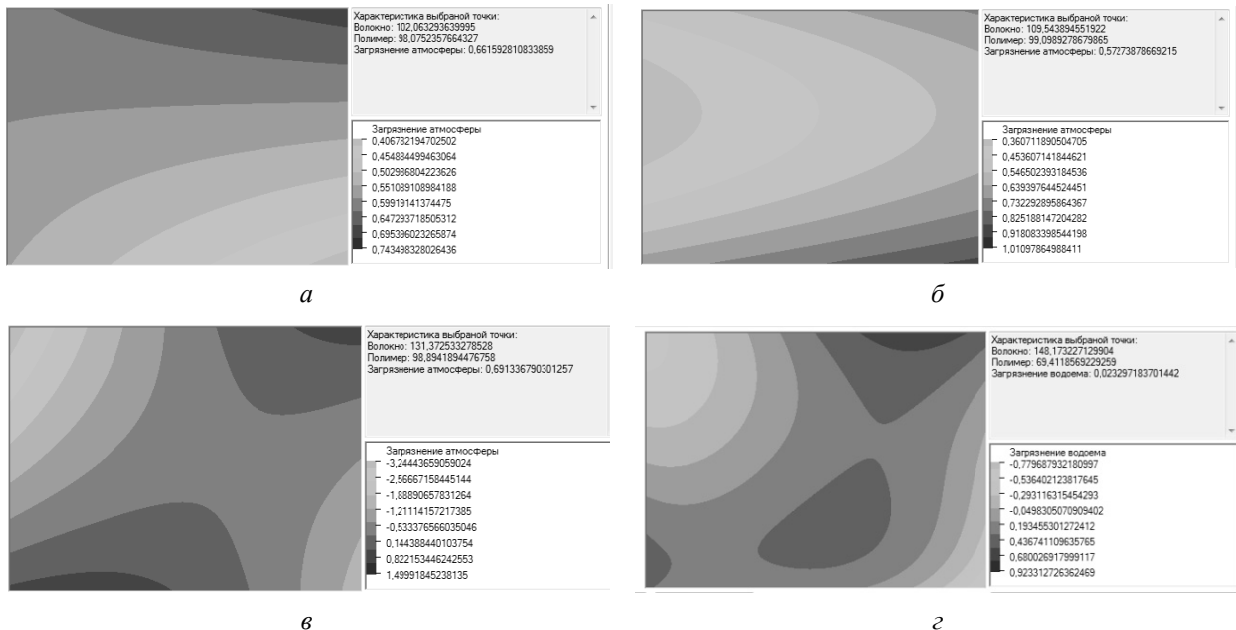


Рис. 2. Примеры математического описания объектов: а – модель парных произведений; б – степенная модель; в – квадратичная модель; г – комбинированная модель

**Заключение.** Разработанное программное средство позволяет не только конструировать модели путем расчета коэффициентов, но и визуализировать построенные модели, сохранять результаты визуализации в файл и сравнивать на второй вкладке интерфейса пользователя. При добавлении для сравнения выполняются расчеты значений модели для всех наборов параметров из таблицы экспериментов, а затем по ним рассчитываются дисперсия и критерий

Фишера. Для идентификации модели в таблицу сравнения заносятся добавленные в таблицу псевдофакторы и значения коэффициентов.

Отличительной особенностью разработанного программного средства является возможность импорта данных из электронных таблиц Excel и построение таблицы сравнения моделей, которые расширяют функционал разработанного приложения и повышают удобство ввода и обработки данных.

### Литература

1. Колесников В. Л., Урбанович П. П., Жарский И. М. Компьютерное моделирование и оптимизация химико-технологических систем. Минск: БГТУ, 2004. 532 с.
2. ОНД 86 – Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 82 с.

### References

1. Kolesnikov V. L., Urbanovich P. P., Zharsky I. M. *Komp'yuternoye modelirovaniye i optimizatsiya khimiko-tekhnologicheskikh sistem* [Computer simulation and optimization of chemical processes]. Minsk, BGTU Publ., 2004. 532 p.
2. *OND 86 – Metodika rascheta kontsentratsiy v atmosfernom vozdukh vrednykh veshchestv, sodержashchikhsya v vybrosakh predpriyatiy* [OND 86 – Method of calculation of concentrations of harmful substances in the air in industrial emissions]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1987. 82 p.

### Информация об авторах

**Колесников Виталий Леонидович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных систем и технологий. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: vitalykolesnikov@mail.ru

**Бракович Андрей Игоревич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем и технологий. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: brakovich@yandex.ru

**Жук Ярослав Александрович** – магистрант. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: zhuk@belstu.by

### Information about the authors

**Kolesnikov Vitaliy Leonidovich** – D. Sc. (Engineering), Professor, Professor, the Department of Information Systems and Technologies. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vitalykolesnikov@mail.ru

**Brakovich Andrey Igorevich** – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Assistant Professor, the Department of Information Systems and Technologies. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: brakovich@yandex.ru

**Zhuk Yaroslav Aleksandrovich** – undergraduate. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zhuk@belstu.by

Поступила 12.03.2015