

Карпов Демид Константинович, студент 4 курса
Уфимский университет науки и технологий

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ

Аннотация. В статье рассмотрены основные подходы к математическому моделированию распространения загрязняющих веществ в городской атмосфере. Описаны уравнение переноса, уровни детализации моделей, требования к исходным данным, методы оценки неопределенности и практическое применение расчетов.

Ключевые слова: Математическое моделирование, атмосфера, загрязнение воздуха, диффузия, мониторинг, городская среда.

Введение

Качество атмосферного воздуха в крупных городах определяется совместным воздействием транспортных потоков, промышленных источников, отопительных систем и метеорологических условий. Непосредственные измерения дают наиболее надежную информацию о концентрации загрязняющих веществ, однако стационарные посты наблюдения охватывают лишь отдельные точки пространства. Для оценки ситуации между постами, прогнозирования неблагоприятных эпизодов и сравнения природоохранных решений применяются методы математического моделирования. Они позволяют представить городскую атмосферу как динамическую систему, в которой перенос примеси сочетается с турбулентным перемешиванием, химическими превращениями и осаждением.

Актуальность моделирования связана с тем, что воздействие загрязнения имеет выраженную пространственную неоднородность. Даже в пределах одного района концентрации могут заметно различаться около магистралей, во дворах, на открытых площадях и в зонах плотной застройки. Всемирная организация здравоохранения рассматривает твердые частицы PM_{2.5} и PM₁₀, озон, диоксид азота, диоксид серы и угарный газ как ключевые загрязнители, для которых установлены ориентиры качества воздуха [1]. Поэтому задача модели состоит не только в вычислении среднего значения, но и в выявлении локальных зон повышенного риска.

Основные принципы математического описания

Базой большинства моделей служит закон сохранения массы примеси. В простейшем случае изменение концентрации C во времени определяется переносом воздушным потоком, диффузией, наличием источников и процессами удаления. Обобщенное уравнение переноса можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial C}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial C}{\partial z} = K_x \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_y \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_z \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \lambda C + S.$$

Здесь u , v и w обозначают компоненты скорости ветра; K_x , K_y и K_z – коэффициенты турбулентного обмена; λ характеризует суммарную скорость удаления или превращения примеси; S задает мощность источников. Уравнение отражает физический смысл процесса: вещество перемещается вместе с воздушной массой, рассеивается вследствие турбулентности и изменяет концентрацию под действием источников и стоков. Подобный подход используется в широком классе экологических моделей [2].

Для оперативных расчетов применяется гауссова модель факела, основанная на стационарном ветре и нормальном распределении концентрации. Она проста, но недостаточно точно описывает плотную застройку, где здания создают вихри, а выбросы транспорта распределены вдоль дорог.

Уровни детализации моделей

Выбор модели зависит от масштаба задачи. Региональные модели описывают перенос на десятки и сотни километров и учитывают взаимодействие множества источников. Городские модели работают с сеткой от сотен метров до нескольких километров и позволяют



оценивать фоновые поля концентраций. Микромасштабные модели рассматривают отдельную улицу, перекресток или квартал. На этом уровне существенными становятся геометрия зданий, ширина улицы, высота источника и режим движения транспорта.

Наиболее детальное описание дает вычислительная гидродинамика. Пространство разбивается на множество ячеек, в каждой из которых численно решаются уравнения движения воздуха и переноса примеси. Метод способен воспроизводить рециркуляционные зоны за зданиями и эффект уличного каньона. Вместе с тем точность результата зависит от качества геометрической модели, граничных условий и выбранной схемы турбулентности. Увеличение числа ячеек повышает детализацию, но резко увеличивает требования к вычислительным ресурсам.

Для мониторинга перспективен гибридный подход: физическая модель задает закономерности переноса, а данные сенсоров уточняют расчетное поле. Методы машинного обучения могут выявлять дополнительные зависимости, но не должны полностью заменять физическое описание.

Исходные данные и оценка неопределенности

Качество модели определяется качеством входных данных. Для расчета необходимы сведения о скорости и направлении ветра, температурной стратификации, влажности, рельефе, параметрах застройки и выбросах. Наиболее трудной частью является инвентаризация источников. Для автомобильных дорог требуется знать интенсивность движения, состав потока, среднюю скорость и режимы разгона. Для стационарных объектов учитываются координаты, высота трубы, температура и скорость газов, а также массовый расход вещества.

Неопределенность возникает на каждом этапе: измерительные приборы имеют погрешность, выбросы меняются во времени, метеорологические параметры неоднородны, а численная схема упрощает реальный процесс. Поэтому результат следует представлять не как абсолютно точное число, а как оценку с диапазоном возможных значений. Один из способов анализа – многократный расчет при варьировании входных параметров. Если небольшое изменение параметра приводит к значительному изменению концентрации, такой параметр считается чувствительным и требует особенно точного измерения.

Обязательным этапом является валидация, то есть сравнение модельных значений с независимыми наблюдениями. Для оценки могут использоваться средняя ошибка, среднеквадратическое отклонение, коэффициент корреляции и доля прогнозов, попавших в допустимый интервал. При этом высокая корреляция сама по себе не гарантирует отсутствия систематического завышения или занижения. Поэтому необходимо применять несколько показателей и анализировать модель отдельно для разных сезонов и метеорологических режимов.

Практическое применение

Математическая модель может использоваться для выбора расположения постов наблюдения, оценки последствий строительства новой дороги, сравнения вариантов организации движения и определения санитарно-защитных зон. В режиме краткосрочного прогноза она помогает заранее выявлять условия накопления примеси при слабом ветре и температурной инверсии. Результаты могут быть представлены в виде карт концентраций и индексов качества воздуха, понятных органам управления и населению.

Сценарный анализ позволяет сравнивать последствия снижения транспортного потока, обновления общественного транспорта или создания зеленых зон. Он показывает направление и относительный масштаб эффекта и тем самым помогает обосновывать решения.

При использовании результатов необходимо учитывать правовой и этический аспекты. Модель не должна подменять обязательные измерения, а исходные допущения должны быть открытыми для проверки. Федеральное законодательство закрепляет необходимость охраны окружающей среды и достоверной информации о ее состоянии [3]. Следовательно, расчетная система должна сопровождаться описанием источников данных, версии модели и уровня неопределенности.



Заключение

Математическое моделирование качества воздуха объединяет дифференциальные уравнения, численный анализ, статистику и науки об атмосфере. Простые схемы подходят для оперативных оценок, а детальные – для сложной застройки и локальных источников. Сочетание физической модели и наблюдений повышает полноту мониторинга и обоснованность природоохранных решений.

Список литературы:

1. World Health Organization. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: WHO, 2021. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228> (дата обращения: 05.08.2026).
2. Marchuk G. I. Mathematical Models in Environmental Problems. Amsterdam: Elsevier, 1986. 217 p.
3. Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» // Официальный интернет-портал правовой информации.
4. Seinfeld J. H., Pandis S. N. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. 3rd ed. Hoboken: Wiley, 2016. 1152 p.

