

**УДК 519.876.5**

КЕЧКО А. С., КУРБАТОВ В. Ю., МАНУЙЛОВА А. Е.,  
студенты гр. ТБ-41 (НИУ МИЭТ)  
Научный руководитель ПОПОВА Н. В., к.т.н. (НИУ МИЭТ)  
г. Зеленоград

## **РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ ЦИФРОВОГО СИМУЛЯТОРА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ**

Одной из наиболее значительных экологических проблем для больших городов является загрязнение атмосферного воздуха. Источники загрязнения обычно делят на точечные (единичные дымовые трубы или вентиляционные шахты производственных предприятий), линейные (аэрационные фонари или автодороги) и площадные (лесные пожары, разливы нефти или полигоны по захоронению отходов). Загрязняющие вещества, выбрасываемые разными типами источников, рассеиваются и могут перемещаться на большие расстояния от точки эмиссии; конкретные нюансы этого процесса зависят от физических и химических свойств самих веществ, технических характеристик источников, метеорологических параметров, ландшафта местности, городской застройки. Загрязнение атмосферного воздуха оказывает негативное влияние на здоровье людей и имеет длительные последствия для экосистем, поэтому важной задачей хозяйственной деятельности в современных городах становится организация мониторинга качества атмосферного воздуха.

Для сохранения здоровья людей, оптимизации контрольных мероприятий и снижения экологических издержек разрабатываются математические и компьютерные модели рассеивания загрязняющих веществ воздуха. Такие модели позволяют оценивать уровень загрязнения, вызванного тем или иным источником; анализировать его вклад в общее загрязнение города; учитывать суммацию выбросов от всех источников; строить прогнозы; обосновывать размещение точек периодического мониторинга атмосферного воздуха и планирования мероприятий для устойчивого развития городов.

В рамках данной работы был проведен анализ существующих математических моделей рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. Кроме того, был выполнен сравнительный анализ компьютерных моделей и программных продуктов, основанных на рассмотренных математических моделях. Мы выделили их достоинства и недостатки, на основе чего разработали предполагаемую структуру, функциональные возможности и сценарий пользователя цифрового симулятора распространения загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городской среды (далее Симулятор).

Для моделирования рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе используются различные математические модели рассеивания примесей; некоторые из них нацелены на расчет конкретного загрязнителя, другие подходят для комплексных расчетов. В рамках данной работы были

рассмотрены Гауссовы модели — в частности, стационарная и нестационарная Гауссова модель, модель Пасквилла-Бригса, модель Сеттона [1]. Данные модели основаны на гипотезе о том, что распределение частиц в эмиссионном облаке близко к нормальному, а это довольно просто описать математически и реализовать программно.

Кроме того, была рассмотрена и модель турбулентной диффузии, которая используется в методах расчета рассеивания выбросов загрязняющих веществ, утвержденных приказом Минприроды России от 06.06.2017 №273 [2]. Авторы изученной нами статьи [3] отмечают, что данный подход сложно применить для прогнозирующих моделей. Также следует отметить, что такие методы требуют больше входных параметров, чем модели Гаусса. При этом некоторые параметры (например, диаметр устья источника) будут известны только проектировщикам, специалистам по эксплуатации основных фондов на предприятии и, возможно, штатному экологу.

Были рассмотрены и модели на основе уравнений в частных производных, которые используют дифференциальные уравнения, описывающие движение воздушной среды (например, уравнения Навье-Стокса), совместно с уравнениями диффузии и перемещения загрязняющих веществ в потоке воздуха [4]. Также нами были изучены уравнения регрессии на основе статистических данных, которые позволяют рассчитывать рассеивание пыли в атмосфере и прогнозировать рассеивание. Тем не менее, из-за того, что модель основана на статистической обработке данных, она довольно специфична и может использоваться только в определенной местности [5]. Кроме прочего, в рамках данной работы были рассмотрены дифференциальные уравнения Лагранжа, хотя этот подход эффективен только для малых расстояний [6], и уравнения Эйлера, в которых используется формула сохранения массы для каждого конкретного загрязняющего вещества. В отличие от модели Лагранжа, в модели Эйлера используется неподвижная пространственная решетка, привязанная к реальным географическим координатам. Основная идея расчетов состоит в одновременном решении соответствующих уравнений во всех ячейках решетки, учитывая при этом взаимный обмен загрязняющими веществами между ячейками во всех точках решетки [7].

Уравнения в частных производных, уравнения регрессии на основе статистических данных, дифференциальные уравнения Лагранжа и уравнения Эйлера, на наш взгляд, довольно сложны для компьютерной реализации большого количества источников одновременно (как вариант, их можно использовать в качестве дополнения к моделям Гаусса). Как следствие, было принято решение использовать для первой версии разрабатываемого Симулятора математический аппарат, основанный на модифицированных моделях Гаусса.

Помимо существующих математических моделей, были также проанализированы программные реализации рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, основанные на рассмотренных математических

моделях, которые используются в разных странах для расчета выбросов предприятий, их нормирования и государственного регулирования (УПРЗА «Эколог», ADAM, AERMOD, Austal2000) — или для прогнозирования, научных исследований и в образовательных целях (AFTOX, CALINE3, CAL3QHC, CAL3QHCR, CALPUFF, DEGADIS, RASCAL, LOTOS-EUROS). Изучено описание, функциональные возможности, интерфейс вышеупомянутых компьютерных моделей; кроме того, у некоторых программ с доступным открытыми версиями было исследовано и удобство использования. Были выявлены некоторые недостатки реализованных программных продуктов. Исходя из них можно сделать вывод, что на данный момент в открытом доступе нет программы, которая позволяет одновременно: устанавливать различные типы источников (точечные, линейные и площадные); визуализировать рассеивание загрязняющих веществ от большого количества источников; учитывать не только параметры самих источников загрязнения атмосферы, но и динамические метеорологические параметры, рельеф местности, особенности городской застройки и т.п.

На основе проведённой оценки математических моделей и программных продуктов были разработаны основные концептуальные особенности Симулятора распространения загрязняющих веществ в атмосферном воздухе:

- формат открытой веб-платформы, на базе которой зарегистрированные пользователи смогут создавать цифровые двойники городов, размещая на интерактивной карте источники загрязнения атмосферы, настраивая их параметры, фоновые концентрации загрязняющих веществ, метеорологические условия — эти функции будут уже в Версии 1, а в Версии 2 добавится опция настройки рельефа местности и городской застройки;

- возможность моделировать точечные, линейные и площадные источники загрязнения атмосферы;

- наличие базы стандартных источников загрязнения атмосферы (также сами пользователи смогут добавлять стандартные источники в эту базу);

- послойная визуализация полей рассеивания для различных источников загрязнения атмосферы и загрязняющих веществ в 2D (Версия 1) и 3D с учетом визуализации обтекания препятствий (Версия 2).

Первая версия разрабатываемой программы должна обладать следующими функциями:

- авторизация и регистрация: пользователи должны иметь возможность создавать учетные записи и входить в систему;

- поиск населенного пункта: возможность поиска городов и населенных пунктов на интерактивной карте для начала работы;

- изменение масштаба карты: интуитивный интерфейс для увеличения и уменьшения масштаба карты;

- добавление и настройка источников загрязнения: пользователь может выбирать источники загрязнений из базы данных, настраивать их

характеристики (например, тип загрязняющего вещества или объём выбросов) и сохранять шаблоны для дальнейшего использования;

- модерация моделей: после завершения настройки цифрового двойника пользователи смогут отправить свою модель на модерацию, и при успешном прохождении модерации модель станет доступной для других пользователей;

- построение полей рассеивания: возможность визуализировать и анализировать поля рассеивания загрязняющих веществ для каждого источника на карте (в 2D);

- переключение слоев загрязняющих веществ: пользователи смогут переключаться между слоями, на каждом из которых будут отображаться различные загрязняющие вещества;

- фильтрация источников загрязнения: доступ к фильтрам, позволяющим выбрать отображение только промышленных или только бытовых источников загрязнения.

Предлагаемый Симулятор может быть использован в учебных и исследовательских целях для проведения виртуальных экспериментов с моделированием распространения загрязняющих веществ в атмосферном воздухе конкретных городов; для выделения основных источников загрязнения атмосферы; для обоснования точек периодического мониторинга атмосферного воздуха и планирования мероприятий с целью устойчивого развития городов.

#### Список литературы:

1. Абдула Ж. Моделирование распространение вещества в нижнем слое атмосферы // *Ecological Technologies*. 2016. С. 174–176.
2. Приказ Минприроды России от 06.06.2017 N 273 «Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе».
3. Базарский О.В., Косинова И.И., Фонова С.И. Математическая модель загрязнения приповерхностных отложений аэрозольными частицами // *Инженерные изыскания*. 2015. № 5-6. С. 76-79.
4. Запасная Л. А., Савицкая Т. В. Сравнительный анализ моделей прогнозирования загрязнения атмосферного воздуха источниками выбросов опасных химических веществ // *Успехи в химии и химической технологии*. 2011. №1 (117).
5. Maruntalu O. Mathematical model for air pollutants // *U.P.B. Sci. Bull., Series D*. 2015. № April.
6. Антропов К.М., Вараксин А. Н. Методология описания загрязнения атмосферного воздуха Екатеринбурга диоксидом азота методом land use regression // *Гигиена и санитария*. 2013. №2.
7. Pospelov B. Mathematical model of determining a risk to the human health along with the detection of hazardous states of urban atmosphere pollution based on measuring the current // *Ecology*. 2020. С. 37–44.