

НЕКОТОРЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ РАССЕЙВАНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

С.Г. Ницкая^{1✉}, А.В. Геренштейн¹, Д.А. Дрозин¹, А.А. Замышляева¹,
С.М. Елсаков¹, В.А. Сурин¹, Т.Ю. Оленчикова¹, А.П. Басманов²

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

² ООО «ММК-Информсервис», г. Магнитогорск, Россия

✉ nitckaiasg@susu.ru

Аннотация. Состояние атмосферного воздуха городских территорий в настоящее время является проблемной ситуацией. Оценка характеристик воздушной атмосферы мегаполисов и промышленных агломераций предполагает определение и контроль текущего состояния, а также прогнозирование величины приземных концентраций загрязняющих веществ на ближайшую перспективу. Решение этих вопросов возможно на основе математического моделирования процессов переноса загрязнений в воздушной среде. В настоящее время разработано значительное количество математических моделей и программных комплексов различной степени сложности, отражающих распространение загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. Разработанные математические модели рассеивания загрязнений в атмосфере мегаполисов не всегда отражают быстрое изменение состояния воздушной среды в случае возникновения неблагоприятных метеорологических условий. Обеспечение нормативных требований качества воздушной среды жилых районов при разработке математических программных моделей переноса примесей предполагает учет всех источников выбросов загрязняющих веществ на территории населенных мест, а также особенностей градостроительной архитектуры и климатических условий. Применение прогностических моделей дает возможность своевременного регулирования степени загрязнения воздушного бассейна города. Представлены подходы к математическому моделированию пространственного распространения загрязняющих веществ в воздушной среде мегаполисов. Рассмотрены модели рассеивания вредных веществ в ограниченном пространстве улиц, отражены основные факторы, учитываемые при разработке алгоритмов перемещения загрязненных воздушных масс. Отмечено влияние геометрических форм строений и подстилающей поверхности территорий жилой застройки. Приведены результаты экспериментальных исследований, отмечающие воспроизводимость и удовлетворительную сходимость выявленных закономерностей процессов загрязнения воздушной атмосферы и теоретических расчетов.

Ключевые слова: атмосферный воздух, городская среда, загрязнение воздуха, распространение загрязняющих веществ, моделирование

Для цитирования: Некоторые подходы к моделированию рассеивания загрязняющих веществ в условиях городской застройки / С.Г. Ницкая, А.В. Геренштейн, Д.А. Дрозин и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2024. Т. 16, № 3. С. 171–181. DOI: 10.14529/chem240312

SOME APPROACHES TO MODELING THE DISPERSION OF POLLUTANTS IN URBAN DEVELOPMENT

S.G. Nitskaya^{1✉}, A.V. Herreinstein¹, D.A. Drozin¹, A.A. Zamyshlyeva¹,
S.M. Elsakov¹, V.A. Surin¹, T.Y. Olenchikova¹, A.P. Basmanov²

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² LLC MMK-Informservice, Magnitogorsk, Russia

✉ nitckaiasg@susu.ru

Abstract. The state of atmospheric air in urban areas is currently a problem. The assessment of the atmospheric characteristics of megacities and industrial agglomerations involves determination and control of the current state, as well as forecasting the magnitude of surface concentrations of pollutants in the near future. The solution of these issues is possible on the basis of mathematical modeling of pollution transfer processes in the ambient air. Currently, a significant number of mathematical models and software complexes of varying degrees of complexity have been developed, reflecting the spread of pollutants in the atmospheric air. The developed mathematical models of the dispersion of pollutants in the atmosphere of megacities do not always reflect the rapid change in the state of the ambient air in the case of adverse meteorological conditions. Ensuring regulatory requirements for the air quality of residential areas in the development of mathematical software models for transfer of impurities involves taking into account all sources of pollutant emissions in populated areas, as well as features of urban architecture and climatic conditions. The use of predictive models makes it possible to timely regulate the degree of pollution of the city air basin. Approaches to mathematical modeling of spatial distribution of pollutants in the ambient air of megacities have been presented. The models of dispersion of harmful substances in a limited space of streets have been considered, the main factors necessary in the development of algorithms for the movement of polluted air masses have been reflected. The influence of geometric shapes of buildings and the underlying surface of residential areas has been noted. The results of experimental studies are presented, which include the reproducibility and satisfactory convergence of the revealed patterns of air pollution processes and theoretical calculations.

Keywords: atmospheric air, urban environment, air pollution, pollutant dispersion, modeling

For citation: Nitskaya S.G., Herreinstein A.V., Drozin D.A., Zamyshlyeva A.A., Elsakov S.M., Surin V.A., Olenchikova T.Y., Basmanov A.P. Some approaches to modeling the dispersion of pollutants in urban development. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chem.* 2024;16(3):171–181. (In Russ.) DOI: 10.14529/chem240312

Развитие мегаполисов сопровождается трансформацией естественных ландшафтов, сопутствующим фактором преобразований является загрязнение объектов окружающей среды. Качество атмосферного воздуха городских районов представляет актуальную проблему на данный момент времени. При оценке состояния воздушной среды рациональным подходом является математическое моделирование процессов рассеивания в воздухе загрязняющих веществ с последующим анализом поведения примесей и разработка практических подходов к решению вопросов охраны атмосферы.

Распространение вредных веществ определяется гидрометеорологическими условиями, рельефом местности, трансформацией веществ за счет физико-химических превращений, взаимодействием с подстилающей поверхностью, также следует учитывать региональные природные, антропогенные и климатические особенности территории.

Математическое моделирование рассеивания примесей в атмосферном воздухе в условиях городской застройки требует комплексного учета многих факторов, влияющих на качество атмосферы, таких как геометрические формы зданий и сооружений, планировочные решения, зеленые зоны и водные объекты. Каждый показатель характеризуется специфическими особенностями, что приводит к необходимости использования для их учета разных математических моделей и баз данных [1].

Существующие математические модели не всегда могут быть использованы для оперативного прогноза уровня загрязнения, так как не учитывают быстрое изменение ряда факторов в условиях городской застройки, в том числе метеорологических.

Прогнозирование распределения загрязняющих веществ в районе улиц, вокруг зданий и сооружений является одним из направлений исследований в области контроля качества атмосферного воздуха. Расчет обтекания ветровым потоком необходим для определения ветровых нагрузок на конструкции здания, учета влияния ветра на воздухообмен помещений, концентрацию загрязняющих веществ в воздухе на территории городов. Информация о распределении ветровых нагрузок на сооружениях может быть получена с помощью методов физического (в аэродинамических трубах) или математического (компьютерного) моделирования.

Использование методов математического моделирования позволит детально проанализировать скоростные, температурные поля, поля давлений и концентраций веществ в области изучаемого физического процесса и явления. Проведение экспериментов в аэродинамических трубах в комбинации с численными расчетами является способом определения объективности разработанных математических моделей.

Особенность городской среды отражается в значительной площади искусственных воздухо- непроницаемых поверхностей (асфальт, бетон и т. п.), что влияет на распространение загрязняющих веществ в атмосфере. Факторы, определяющие рассеивание загрязняющих веществ и качество атмосферного воздуха, включают параметры городской территории (этажность и геометрия застройки; ширина и длина, ориентация улиц; площадь озелененной территории), а также положение источника загрязнения относительно зданий различной этажности.

Создание условий аэрации, влияющей на условия рассеивания загрязняющих веществ и естественную вентиляцию в городской застройке, является одной из задач градостроительства и изучается исследователями в области архитектуры и строительства [2–5].

Одним из направлений изучения рассеивания загрязняющих веществ является использование математических моделей для прогнозирования распределения воздушных потоков и загрязнений для городов в условиях плотной застройки улиц.

Для моделирования распределения загрязняющих веществ в конфигурациях потоков ближнего поля авторы применили вычислительный гидродинамический метод CFD (rCFD) [6].

Предложена версия rCFD, в которой область разбивается на участки (острова) с сигнатурами потоков воздуха. Это вводит пространственную композицию доменов, зависящую от локального выделения особенностей потока.

Представлен анализ существующих моделей рассеивания, показаны достоинства и недостатки каждой из них. Отмечено, что при CFD-моделировании городских потоков не могут быть решены мелкомасштабные особенности потока, но их влияние может быть смоделировано с помощью соответствующей модели турбулентности (модели Навье – Стокса, усредненные по Рейнольдсу (RANS), или модели моделирования больших вихрей (LES)). Представлена характеристика применяемых моделей:

1. RANS основаны на усреднении турбулентных флуктуаций по времени независимо от их пространственного масштаба. Вычислительно менее затратны, чем LES, но имеют меньшую прогностическую способность.

2. LES разрешают крупномасштабные турбулентные флуктуации, моделируя пространственно малые масштабы с помощью подсеточной модели. Используются при исследованиях рассеивания загрязняющих веществ в ближней зоне населенных пунктов.

Повышение вычислительной эффективности LES без значительной потери точности можно рассматривать как основное требование и задачу для более широкого применения LES в моделировании рассеивания загрязняющих веществ в ближней зоне.

Основные этапы можно резюмировать следующим образом:

- 1) усредненное по времени поле флуктуации завихренности пространственно сглаживается, чтобы не получить слишком маленькие острова;
- 2) определяются оставшиеся локальные максимумы;
- 3) от максимумов расширяются отдельные острова в сторону соседних.

Далее строится рекуррентная матрица для каждого из субдоменов, определяются рекуррентные пути, приводящие к меняющимся во времени коммуникационным сетям (схемы сдвига между клетками) для каждого острова.

Все функциональные возможности подхода rCFD на основе острова были реализованы в рамках ANSYS Fluent V19.2 с помощью функций, определяемых пользователем.

Представлены результаты тестирования разработанного метода rCFD на базе островов на двух примерах:

1. Два близко стоящих здания кубической формы. В этом случае rCFD-моделирование хорошо согласуется с соответствующими результатами CFD-моделирования на основе LES. Модели rCFD на основе островных данных обладают улучшенными прогностическими возможностями, моделирование выполняется примерно в тысячу раз быстрее.

2. Условия реальной городской среды. В этом случае моделирование rCFD на основе островов осуществимо на сетке из 10 миллионов ячеек, проводится примерно в 5 тысяч раз быстрее и показывает приемлемые результаты (прогнозы хорошо согласуются с соответствующими результатами эталонного CFD-моделирования на основе LES).

Результаты демонстрируют, что рассеивание загрязняющих веществ в ближнем поле сложной городской среды может быть эффективно смоделировано с помощью метода rCFD, базирующегося на островах. Существующие количественные расхождения могут быть связаны с недооценкой локального накопления загрязнений в области рециркуляции здания, расположенного далее по движению воздуха.

Совершенствование моделей рекуррентного CFD (rCFD) метода, применение для моделирования распределения загрязняющих веществ в атмосфере городской застройки отражены в работах [7–9].

Многие авторы, характеризуя математические методы, делают основной упор на уравнения, описывающие движение воздуха и переноса загрязняющих частиц. Однако решающую роль при этом оказывают, как бы странным это не казалось, краевые условия на границе области распространения выбросов (об этом зачастую не упоминается), а также краевые условия на стенках и крышах зданий и численные методы, реализующие эти особенности.

При этом стоит отметить, что уравнения с частными производными (например, уравнения гидродинамики) – это асимптотика конечноразностных методов. Поэтому излишнее измельчение, равно как и огрубление вычислительной сетки, скажется отрицательно на результатах вычислений по сравнению с экспериментальными наблюдениями.

Как упоминалось выше, требуется правильно учитывать краевые условия на стенках зданий (причем узлы сетки не обязаны находиться на стенках и крышах зданий), дабы эти условия обеспечивали непроницаемость этих самых стенок. Для этого надо внутри здания организовать искусственный (фиктивный) поток, чтобы при его взаимодействии с внешним (вне здания) потоком обеспечить эту непроницаемость. Кроме этого, надо учесть, что выделенная область вычислительной сетки не имеет физических границ (стенок, непроницаемых поверхностей), поэтому надо обойти трудности при описании краевых условий на таких фиктивных границах, ибо изменчивость потока при этом определяется заданием изменчивых краевых условий.

В материалах [10] представлен анализ методов рассеивания загрязняющих веществ в условиях градостроительной структуры. Отмечено, что на движение воздушных масс и диффузию загрязняющих веществ влияют высота зданий, форма крыши и геометрия уличного пространства. Численно исследован ветровой поток и рассеивание загрязняющих веществ в условиях узких городских улиц (в каньоне) с разным процентным соотношением открытых и закрытых окон, скоростью ветра и формой крыш зданий.

Эксперимент проводился в аэродинамической трубе Метеорологического института Гамбургского университета. Расчетная область состояла из уличного каньона, в котором располагаются здания с крышами различной формы (плоская и наклонная, подветренная и наветренная стороны), разным количеством открытых окон и линейным источником загрязнения в центре. Задаются профили скорости ветра, условия безградиентности. В верхней части рассматриваемого слоя применяется граничное условие симметрии. Загрязняющие вещества поступают с постоянным объемным расходом из линейного источника, твердые поверхности в уличном каньоне с противоскользящим покрытием. Усредненный по Рейнольдсу показатель Навье – Стокса для по-

тока жидкости и принципов переноса используется для описания воздушного потока и рассеивания загрязняющих веществ в уличных каньонах при различном проценте открывания окон (WOP), скорости ветра и форме крыши в терминах уравнений непрерывности, импульса и переноса. Уравнения для турбулентной кинетической энергии и скорости турбулентного рассеивания решаются по стандартной схеме $k-\epsilon$. Предполагается, что поток ветра в уличном каньоне несжимаемый и турбулентный, а плотности воздуха и загрязняющих веществ постоянны.

Отмечено влияние формы крыши на характеристики ветрового потока, особенно при ветре, дующем поперек уличного каньона. Показано, что для всех типов форм крыш зданий с увеличением степени открытия окон концентрация загрязняющих веществ постепенно уменьшается, независимо от места расположения. В реальном городском уличном каньоне степень открытия окон оказывает положительное влияние на удаление загрязняющих веществ, распределенных по верхним сторонам подветренной и наветренной стены.

Разработана численная модель, основанная на вычислительной системе с открытым исходным кодом, обсуждены различные модели турбулентности и переноса загрязнений. Приводятся (для несжимаемой жидкости при скоростях стационарного ветра 5–15 м/с изменение плотности воздуха относительно стандартной меньше 2 %) уравнения неразрывности, движения, турбулентности и переноса, необходимые в любой внутренней точке области, однако граничных условий (кроме земли) нет.

В большинстве случаев визуализация и подтверждение разработанных моделей осуществляется проведением опытов в аэродинамической трубе. Эксперименты в аэродинамической трубе, как отмечают многие исследователи, позволили уточнить развитие процессов рассеивания загрязняющих веществ при различных формах крыш зданий и геометрии улиц городской застройки [11–13].

Территория городов, как правило, представляет собой пространство повторяющихся линейных сооружений с различной геометрией, ограниченных двумя близко стоящими вертикальными рядами зданий с незначительной воздухопроницаемостью.

Следует отметить исследования, направленные на изучение взаимосвязи между отработанными газами транспортных потоков, геометрическими параметрами придорожных зданий и крыш, а также древесной растительностью на состояние атмосферного воздуха улиц в городской черте. Так, в работе [14] с использованием CFD было выполнено численное моделирование переноса загрязнений воздуха в атмосферном турбулентном пограничном слое для улицы с придорожными зданиями трех типичных форм крыш: плоская, треугольная и круглая. Рассмотрены варианты расположения на улице зеленого покрова в виде деревьев и без растительности. Исследуются средние характеристики течения, распределение турбулентной кинетической энергии (ТКЕ) и концентрации загрязнения воздуха.

Установлено, что концентрация загрязнения воздуха в значительной степени зависит от характера потока и распределения ТКЕ, а крыша треугольной формы может привести к снижению содержания загрязняющих веществ. Наличие придорожных деревьев способствует уменьшению загрязнения воздушной атмосферы, но эффект ниже, чем от геометрии крыши.

Показано, что более высокие уровни загрязняющих веществ на дорогах связаны с уменьшением естественной вентиляции в более узком пространстве. При различных конструкциях придорожных зданий различие в форме крыш изменит естественную вентиляцию улиц и степень переноса загрязняющих веществ.

Исследовано рассеивание загрязняющих веществ от транспортных средств с использованием CFD, рассматривались изотермические и несжимаемые потоки жидкости. Представлены управляющие уравнения для сохранения массы и импульса. Загрязнение воздуха выхлопными газами автомобиля рассматривается как пассивный скаляр. Рассмотрено уравнение переноса скалярной концентрации.

Все уравнения дискретизируются по схеме второго порядка, связь давления и скорости решается с помощью алгоритма SIMPLE. Посадка деревьев моделируется в виде двух прямоугольных ящиков. Зона посадки деревьев считается пористой областью, так как поток воздуха может проходить через крону дерева. Представлены уравнения моделирования растительности.

Показано, что все средние потоки для разных случаев похожи. Небольшая область рециркуляции наблюдается с наветренной стороны первого авангардного здания у земли. Существуют

область рециркуляции в ущелье улицы и длинная область низкой скорости за последним зданием. Отмечено, что крыша треугольной формы может активизировать разделение потока вблизи крыши, а для круглой и треугольной крыш модели среднего потока похожи.

Вариант зданий с треугольной формой крыш и деревьями по обе стороны уличного каньона показал минимальную концентрацию загрязняющих веществ в уличных каньонах.

В исследованиях, посвященных совместному влиянию формы крыши и положения источника загрязнения относительно зданий на перенос загрязняющих веществ между улицами и трехмерным городским массивом, отмечается, что форма крыши, асимметричная конфигурация высоты зданий и расположение источника загрязнения оказывают решающее влияние на турбулентный перенос загрязняющих веществ [15, 16.].

В работе [17] представлены результаты исследования рассеивания загрязняющих веществ, поступающих из источников, расположенных на разных позициях около высотного здания. Разработана программа, предназначенная для моделирования поля ветрового потока и рассеивания загрязняющих веществ, которая подтверждена результатами исследований в аэродинамической трубе.

Модель была использована для исследования распространения загрязняющих веществ вокруг высотного здания прямоугольной формы при различном азимутальном расположении источника выбросов. В результате численного моделирования определены концентрации загрязняющих веществ на разных фасадах и уровнях здания, проанализированы связи с полем ветровых потоков.

Рассматривались граничные условия турбулентного течения в пограничном слое атмосферы. Он должен быть горизонтально однородным как вверх, так и вниз по движению воздуха, что означает согласованность характеристик течения на разных участках вдоль ветрового потока. Данное условие достигнуто за счет совместной калибровки функций стенки и сетки пограничного слоя (модель $k-\varepsilon$ была улучшена с помощью пользовательской модели). Сравнительный анализ показал достоверность численной модели.

Отмечается, что концентрация загрязняющих веществ k_s на здании уменьшается с увеличением расстояния от источника загрязнения. Распределение концентрации в зависимости от расстояния и сегмента расположения источника усложняется (при сочетании γ и θ). На наветренной стороне максимальная величина k_s наблюдалась при $\theta \cong 0^\circ$ (резко уменьшалась с увеличением θ), а на боковой и подветренной сторонах – при $\theta \approx 0^\circ$ и $\theta \approx 180^\circ$.

Эти особенности связаны с полем ветрового потока вблизи здания, так как максимальный уровень k_s на подветренной стороне – следствие образования значительного рециркуляционного потока.

Показано, что загрязняющие вещества, выбрасываемые из источника на поверхности земли, накапливаются на нижних уровнях высотного здания и уменьшаются с увеличением высоты, на торцах вертикальное распределение k_s определяется восходящими потоками вблизи грани стены.

Значения концентрации загрязняющего вещества k_s на разных фасадах зданий, полученные на основе CFD-моделирования и предложенной математической модели, хорошо соотносятся для всего диапазона положения источника загрязнения. Возможность применения модели для зданий с более сложными формами проиллюстрированы на примере здания крестообразной формы. На основе смоделированных данных разработана математическая модель оценки общей концентрации загрязняющих веществ на стенах и торцах здания с учетом выбросов загрязняющих веществ из разных секторов расположения источника вокруг здания.

Прогнозирование рассеивания загрязняющих веществ в городском пространстве отражено в работах [18–23].

Параметры воздушной среды влияют на эффективность естественной вентиляции, распределение температуры, качество воздуха, теплопередачу и другие факторы, связанные с городским и сельским строительством, архитектурой зданий, расположением зданий и улиц. Скорость движения воздуха имеет большое значение для пассивного охлаждения зданий и особенно для строений с естественной вентиляцией. Определенное расположение малоэтажных зданий в сельской местности может действовать как ветрозащита, снижать потери тепла в зимние месяцы за счет уменьшения силы конвекции и влиять на распределение давления по поверхности стен конструкций, качество воздуха внутри и снаружи здания.

В материалах работы [24] представлена визуализация турбулентного потока воздуха вокруг двух последовательно расположенных сельскохозяйственных сооружений с различной конфигурацией крыш (плоская и дугообразная). Исследование проводили в аэродинамической трубе, осуществляя детальный анализ влияния геометрии крыши и расстояния между зданиями на воздушный поток с динамической аппроксимацией.

Для расчета статистических параметров турбулентного течения (усредненный по времени поток и поперечный поток скорости, интенсивность турбулентности и ТКЕ) были использованы мгновенные значения обеих составляющих скорости из прямого решения двумерных уравнений Навье – Стокса методом конечных элементов, затем результаты были количественно сопоставлены с экспериментальными данными в аэродинамической трубе.

Проведены четыре численных эксперимента для изучения влияния геометрии и расстояния между двумя последовательными зданиями на характер движения воздуха. Параметры расчетной области, число Рейнольдса и характеристики турбулентности были выбраны с учетом соответствия экспериментам в аэродинамической трубе (её высота исключала влияние на структуру воздушного потока вокруг конструкций).

Для решения уравнений NS и неразрывности наряду с выбранными начальными и граничными условиями использовался стандартный метод конечных элементов Галеркина. Программа, написанная на FORTRAN, использовалась для моделирования обтекания двух последовательных сооружений с крышей дугообразного типа.

Средние значения скорости потока и поперечной скорости основаны на стандартных уравнениях, мгновенные же значения получались из прямого решения несжимаемых безразмерных уравнений Навье – Стокса и неразрывности и измерялись в каждой точке вычислительной сетки (обе скорости изменялись во времени из-за турбулентных флуктуаций), рассчитаны колебания скорости по потоку и в поперечном направлении.

Значения интенсивности турбулентности по потоку с поперечной скоростью и ТКЕ были рассчитаны по соответствующим уравнениям.

Для всех случаев усредненное по времени распределение скорости следует степенному закону, показатель которого является функцией рельефа местности.

Распределение скорости вокруг двух последовательно расположенных конструкций важно, поскольку меньшая скорость ветра снижает давление на фасад здания и вызывает менее эффективную перекрестную вентиляцию. По некоторым характеристикам смоделированные значения идентичны экспериментальным.

Показано, что конструкции с плоской крышей создают большие зоны рециркуляции, образующиеся в промежуточной части и обеспечивающие более высокую завихренность, чем конструкции крыши арочного типа, что может быть связано с различными точками разделения и повторного присоединения потока воздуха.

По мере увеличения расстояния между двумя сооружениями с крышей дугообразного типа в промежуточной части сооружений наблюдается большее число вихрей. Обнаружено, что сооружения с крышей дугообразного типа и разным расстоянием создают одинаковую зону рециркуляции вследствие разделения и повторного присоединения основного потока. Отмечено, что динамический подход может быть полезным инструментом, используемым в отношении оптимального расположения и эксплуатации сельских сооружений.

В работе для прямого решения двумерных уравнений Навье – Стокса и неразрывности использовались два кода конечных элементов. Результаты проведенных численных экспериментов успешно сопоставлены с опытами в других работах.

Эффекты геометрии и расстояния между двух последовательных сооружений в типичной сельской атмосферной среде впервые представлены с помощью изображения мгновенных линий тока воздуха и статистического анализа прогнозируемых мгновенных значений составляющих скорости. Изменение геометрии крыши и расстояния между сооружениями приводит к иной конфигурации прогнозируемых мгновенных линий тока.

Анализ мгновенных значений линий тока воздуха показал возможность получения более достоверной информации о конфигурации турбулентного потока, чем средние расчетные или экспериментальные значения.

Разработанные коды могут быть важным и надежным инструментом для изучения потока вокруг последовательно расположенных сооружений, оценки влияния геометрии крыш и расстояния между зданиями на конфигурацию естественной вентиляции. Положения максимального и минимального значений турбулентных параметров потока (интенсивность турбулентности по потоку и поперечное направление, турбулентная кинетическая энергия) зависят от геометрии крыши и расстояния между структурами вследствие различных конфигураций потока воздуха.

Значительное количество работ посвящено проблеме загрязнения атмосферного воздуха городских улиц выбросами автотранспорта. Высокие уровни загрязнения городских улиц создаются вследствие увеличения транспортных потоков в ограниченном воздушном пространстве улиц.

В работе [25] представлен обзор методов исследования механизмов и подходов к моделированию рассеивания выбросов загрязняющих веществ от автотранспорта в городской среде. Материалы содержат полевые измерения, эксперименты в аэродинамической трубе и численное моделирование. Подходы к моделированию включают два типа популярных моделей: блочные модели (STREET, CPBM, AURORA, PBM) и гауссовские модели (CALINE, HIWAY, OSPM, CALPUFF, R-LINE, серия ADMS, EPISODE, CityChem, SIRANE, MUNICH). Поясняются основные предположения, фундаментальные принципы, применимые условия и ограничения методов исследования механизмов и подходов к моделированию. Отмечено, что, несмотря на значительное количество разработанных методов, при рассмотрении влияния загрязняющих веществ городского транспорта все еще существуют недостатки, которые проявляются в следующих аспектах:

- исследования в основном сосредоточены на небольших улицах и местных кварталах;
- при моделировании распространения загрязняющих веществ от автотранспорта по региональным и городским территориям антропогенная среда обычно предполагается без фактических данных о профиле здания. Метод способен включать подробные данные о профиле здания, но реализовать крупномасштабное численное моделирование сложно из-за ограничений вычислительной мощности. Версия 5.0 руководства пользователя ADMS-Urban за один цикл может моделировать до 25 зданий, влияние зданий на рассеивание загрязнений возможно моделировать только для точечных источников.

Значительная часть исследований направлена на моделирование рассеивания загрязняющих веществ при определенных скоростях и направлениях ветра, но их не рекомендуется использовать в случаях слабого ветра или безветренного состояния. Например, модель гауссова шлейфа (мне подходит для расчета рассеивания при слабом ветре вследствие предположения независимости диффузии загрязняющих веществ друг от друга каждый час, при этом загрязняющие вещества не могут быть полностью рассеяны за пределами исследуемой территории в течение одного часа, что противоречит основному предположению. Модели гауссовских «затяжек» (дискретного источника) могут имитировать рассеяние слабого ветра, но эта модель требует точных метеорологических условий и соответствующих исходных данных, что приводит к высокой вычислительной сложности и значительным требованиям к вычислительным ресурсам.

Основными направлениями разработки моделей рассеивания выбросов загрязняющих веществ автотранспорта, по мнению авторов, должны быть исследования с учетом условий слабого ветра и сложной архитектурной и строительной городской среды. Кроме того, необходимо учитывать тепловые эффекты, рассеяние вокруг движущихся препятствий и другие условия городской среды

В работах [26, 27] представлена микромасштабная математическая модель, численный метод ее решения, результаты исследования структуры течения в уличном каньоне в зависимости от соотношения ширины улицы и высоты зданий, а также результаты расчета неизотермического турбулентного течения в условиях влияния естественной конвекции. Показано, что для неизотермического турбулентного течения воздуха в каньоне в случае нагрева его наветренной стороны характер течения существенно изменяется и приводит к гораздо более значительному увеличению значений концентрации примеси в каньоне.

В материалах, представленных в работе [28], исследованы методы учета характеристик дорожной сети для оценки уровней эмиссии загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Как отмечают авторы, проблема оценки состояния воздуха и моделирования распространения загрязнений в условиях городской среды требует учета выбросов загрязняющих веществ, производимых потоками автотранспорта. При разработке модуля учета эмиссии загрязняющих веществ авто-

транспортом применяли методику, основанную на численном решении уравнений турбулентной диффузии. Для моделирования разовых концентраций необходим учет массовых выбросов загрязняющих веществ потоком автомобилей.

В работе отмечается, что при оценке уровней загрязнения воздуха автомобильным транспортом среды в зоне интенсивного автомобильного движения следует учитывать не только продукты сгорания автомобильного топлива, но и эксплуатационный износ дорожно-автомобильного комплекса (протекторов шин, тормозной системы и дорожного покрытия). В процессе исследования определена взаимосвязь между источниками воздействия и характеристиками эмиссии загрязняющих веществ, служащими исходными данными для моделирования загрязнения атмосферного воздуха.

Модуль расчета массовых выбросов загрязняющих веществ потоками автотранспорта представляет собой виртуальный инструмент LabVIEW. Входными данными модуля являются данные учета интенсивности дорожного движения. Выходными данными являются значения массовых выбросов загрязняющих веществ, которые применяются качестве входных данных в комплексе с параметрами окружающей среды, пространственными данными жилой застройки, фоновыми концентрациями и климатическими параметрами для модели рассеивания и построения поля приземной концентрации загрязняющих веществ в среде ArcGIS.

Модуль расчета массовых выбросов загрязняющих веществ является составной частью комплексной системы моделирования загрязнения атмосферного воздуха мегаполисов автомобильным транспортом.

Одним из направлений оценки состояния атмосферы и прогнозирования распространения загрязнений в воздухе на территории промышленных регионов являются работы, в которых рассматривается возможность применения комплексных подходов моделирования загрязнения атмосферного воздуха с привлечением технологий геоинформационных систем.

В работе [29] отмечается, что для анализа состояния атмосферного воздуха населенных мест картографическое представление влияния источников загрязнения и процессов распространения загрязняющих веществ, определяемых природными условиями территории и особенностями городской инфраструктуры, является одной из форм контроля состояния атмосферы в динамике. Предложены принципы геоинформационного картографирования потоковых систем урбанизированной территории.

В материалах статьи [30] рассмотрены применяемые методы оценки загрязнения атмосферного воздуха промышленными предприятиями. На основе анализа существующих методов расчетов рассеивания выбросов загрязняющих веществ на базе ГИС ArcGIS for Desktop системы оценки и моделирования загрязнения атмосферного воздуха промышленными объектами при различных метеоусловиях и характеристиках источников загрязнения разработан алгоритм построения поля концентрации загрязняющего вещества в окрестности точечного источника с последующей визуализацией. На основе этого алгоритма предложен подход для расчета суммарного поля концентрации загрязняющих веществ от нескольких источников. Предложенная система оценки и моделирования загрязнения атмосферного воздуха промышленными объектами позволяет осуществлять визуализацию полученных результатов на карте.

Математическое моделирование процессов рассеивания загрязняющих веществ в воздушной атмосфере городской территории направлено на создание адекватных методов оценки качества воздуха в онлайн-режиме при поступлении загрязнений от различных источников. Модульное обеспечение контроля состояния атмосферного воздуха в условиях городской среды, характеризующейся разнообразием типов подстилающей поверхности и количеством источников выбросов, позволит на стадии проектирования жилых территорий учитывать пространственное расположение различных зданий и сооружений, их геометрические формы и характеристики существующих ландшафтов. Оптимизация решений формирования условий рассеивания загрязняющих веществ позволит обеспечить приземные концентрации на допустимом уровне.

Список источников

1. Аргучинцева А.В., Аргучинцев В.К., Вологжина С.Ж. // Известия Иркутского государственного университета, Серия «Науки о Земле». 2009. Т. 2, № 2. С. 20. EDN: MSZMJN

2. Мягков М.С., Алексеева Л.И. // Международный электронный научно-образовательный журнал «Architecture and Modern Information Technologies» («Архитектура и современные информационные технологии»). 2014. № 1 (26). <http://www.marhi.ru/AMIT/2013/4kvart13/petushkova/petushkova.pdf>
3. Лыченко Н.М., Великанова Л.И., Верзунов С.Н., Сорокова А.В. // Вестник КРСУ. Информатика. 2021. Т. 21, № 4. С. 87. EDN: IRIZPF
4. Аджиева А.А., Рязанов В. И., Шаповалов В.А. // Итоги науки и техн. Сер. Современ. мат. и ее прил. Темат. обз.. 2018. Т. 154. С. 3–9.
5. Шкляев В.А., Костарева Т.В. // Географический вестник. 2019. № 1 (48). С. 84. DOI: 10.17072/2079-7877-2019-1-84-92
6. Du Y., Blocken B., Abbasi S., Pirker S. // Environmental Modelling and Software. 2021. V. 145 P. 105172. DOI: 10.1016/j.envsoft.2021.105172
7. Du Y., Blocken B., Pirker S. // Build. Environ. 2020. V. 170. P. 106604 DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106604
8. Dabbagh F., Pirker S., Schneiderbauer S. // AIChE J. 2020. V. 66(5), P. 16931. DOI: 10.1002/aic.16931
9. Abbasi S., Pirker S., Lichtenegger T. // Comput. Fluids. 2020. V. 196. P. 104348. DOI: 10.1016/j.compfluid.2019.104348
10. Liu H., Xiong X., Jin M., Shi L. // E3S Web of Conferences. 2019. V. 136. 05002. DOI: 10.1051/e3sconf/201913605002
11. Huang Y., Hu X., Zeng N. // Building and Environment. 2009. V. 44. P. 2335. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.03.024
12. Yassin M.F. // Atmospheric Environment. 2011. V. 45. P. 5220. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2011.05.060
13. Takano Y., Moonen P. // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 2013. V. 123. P. 107. DOI: 10.1016/j.jweia.2013.10.006
14. Hsu F., Bennett A. // J. Phys.: Conf. 2023. Ser. 2441: 012010. DOI: 10.1088/1742-6596/2441/1/012010
15. Klukova Z., Nosek S., Fuka V. et al. // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2021. V. 208. P. 104468. DOI: 10.1016/j.jweia.2020.104468
16. Akhter N., Ali E., Rahman M. et al. // AIP Advances. 2021. V. 11. P. 065022. DOI: 10.1063/5.0033948
17. Keshavarzian E., Jin R., Dong K. et al. // Applied Mathematical Modelling. 2020. V. 81. P. 582. DOI: 10.1016/j.apm.2020.01.019
18. Cheng Y., Lien F.S., Yee E., Sinclair R. // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 2003. V. 91. P. 1301. DOI: 10.1016/j.jweia.2003.08.001
19. Tominaga Y., Stathopoulos T. // Atmos. Environ. 2013. V. 79. P. 716. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.07.028
20. Chen L., Hang J., Sandberg M. et al. // Build. Environ. 2017. V. 118. P. 344. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.03.042
21. Cui D., Ai Z., Mak C. et al. // Building Simulation. Springer. 2018. P. 1245. DOI: 10.1007/s12273-018-0460-x
22. Parente A., Gorlé C., Beeck J. et al. // Bound. Layer Meteorol. 2011. V. 140 P.411. DOI: 10.1007/s10546-011-9621-5
23. Richards P.J., Hoxey R.P. // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1993. V.46–47. P. 145. DOI: 10.1016/0167-6105(93)90124-7
24. Fragos V. // World Journal of Modelling and Simulation. 2020. V. 16, No. 3. P. 216.
25. Liang M., Chao Y., Tu Y., Xu T. // Atmosphere. 2023. V. 14, No. 2. P. 279. DOI: 10.3390/atmos14020279
26. Данилкин Е.А., Старченко А.В. // Вычислительные технологии. 2020. Т. 25, № 2. С. 4. DOI: 10.25743/ICT.2020.25.2.002
27. Старченко А.В., Данилкин Е.А., Лецинский Д.В. // Матем. моделирование. 2022. Т. 34, № 10. С. 81. DOI: 10.20948/mm-2022-10-05
28. Куракина Н.И., Мышко Р.А. // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 6. С. 90. DOI: 10.32603/1993-8985-2022-25-6-90-100

29. Трубина Л.К., Николаева О.Н. // Геодезия и картография. 2020. № 6. С. 20.
DOI: 10.22389/0016-7126-2020-960-6-20-28

30. Куракина Н.И., Мышко Р.А. // Известия СПб ГЭТУ «ЛЭТИ». 2021. № 5. С. 21.

Ницкая Светлана Георгиевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Экология и химическая технология» Института естественных и точных наук, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: nitckaiasg@susu.ru,

Геренштейн Аркадий Васильевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Прикладная математика и программирование» Института естественных и точных наук, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: gerenshteinav@susu.ru

Дрозин Дмитрий Александрович – кандидат экономических наук, доцент кафедры «Прикладная математика и программирование» Института естественных и точных наук, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: drozinda@susu.ru/

Замышляева Алёна Александровна – доктор физико-математических наук, директор Института естественных и точных наук, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: zamyshliaeva@susu.ru.

Елсаков Сергей Михайлович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Прикладная математика и программирование» Института естественных и точных наук, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: elsakovsm@susu.ru.

Сурин Владимир Анатольевич – старший преподаватель, кафедра «Прикладная математика и программирование» Института естественных и точных наук, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: surinva@susu.ru.

Оленчикова Татьяна Юрьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная математика и программирование» Института естественных и точных наук, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: olenchikovati@susu.ru,

Басманов Алексей Петрович – инженер-программист первой категории ООО «ММК-Информсервис», Магнитогорск, Россия. E-mail: petrovich1997basmanov@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 9 января 2024 г.

The article was submitted 9 January 2024.