

Моделирование распространения загрязняющих веществ в
приземном слое атмосферы с учетом
влияния застройки и рельефа местности

О. И. Седяров^{*1}, Е. С. Бородина^{*}

** Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Россия*

Аннотация

Традиционно оценка загрязнения атмосферного воздуха делается на базе данных о высотах труб, температуре, скорости, объеме и специфических свойствах выбрасываемого аэрозоля с поправками на преобладающее направление ветров и другими изменениями. Допуски данной методики очень велики — это, как правило, средние метеоусловия и единичный источник. Рассеивание загрязняющих веществ (ЗВ) зависит от условий их эмиссии, переноса и турбулентного смешивания. В работе рассмотрены характеристики, влияющие на устойчивость приземных слоев атмосферы и определяющие процессы турбулентного переноса.

В данной работе предложена методика расчета рассеивания загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы, основанная на методах вычислительной гидродинамики. Использование данной методики позволяет учитывать влияние сложного рельефа местности и характера застройки. В качестве примера расчета распространения загрязняющих веществ в работе рассмотрен расчет выбросов ацетона из отдельно стоящего источника, расположенного в непосредственной близости от здания. Представленные результаты расчетов наглядно показывают сложный характер распределения полей концентраций в непосредственной близости от зданий, а также в условиях плотной застройки и сложного рельефа местности. Моделирование такого сложного распределения практически невозможно без использования мощного аппарата вычислительной гидродинамики.

Ключевые слова

Рассеивание загрязняющих веществ, загрязнение атмосферы, компьютерное моделирование, вычислительная гидродинамика, ветровой режим территории, сложный рельеф местности, учет влияния застройки

¹ Для переписки:

Email: sedlyarov-oi@rguk.ru

Введение

В зарубежных исследованиях [1] оценка загрязнения атмосферного воздуха делается на базе данных о высотах труб, температуре, скорости, объеме и специфических свойствах выбрасываемого аэрозоля с поправками на преобладающее направление ветров и другими изменениями. Допуски данной методики очень велики — это, как правило, средние метеорологические условия и единичный источник. Рассеивание загрязняющих веществ зависит от условий их эмиссии, переноса и турбулентного смешивания. Использование полного уравнения для описания этих особенностей называется эйлеровским моделированием рассеивания [2]. При этом способе увеличение и снижение содержания конкретного загрязняющего вещества нужно определять в каждой точке воображаемой пространственной сетки и за отдельные промежутки времени. Так как этот метод очень сложен и требует длительных компьютерных расчетов, им обычно нельзя пользоваться постоянно. Однако во многих случаях применения он может быть упрощен при следующих допущениях:

- неизменность условий выделения загрязняющих веществ со временем;
- неизменность метеорологических условий во время переноса;
- коэффициенты диффузии не зависят от координат;
- скорость ветра не менее 1 м/с.

В этом случае упомянутое выше уравнение может быть решено аналитически. В результате выводится формула, которая описывает шлейф (перо) с гауссовым распределением концентрации — так называемую гауссову перьевую модель [3]. Параметры распределения зависят от метеорологических условий и расстояния в направлении ветра, а также от высоты дымовой трубы. Они должны определяться опытным путем [4]. Ситуации, когда

эмиссии и (или) метеорологические параметры значительно варьируются во времени и/или пространстве, могут быть описаны с помощью гауссовой модели дымного клуба [5]. При этом подходе отдельные клубы дыма выпускаются через фиксированные промежутки времени и каждый из них следует по собственной траектории в соответствии с метеорологическими условиями в данный момент. По пути каждый клуб увеличивается в размерах в соответствии с турбулентным смешиванием. Параметры, описывающие его рост, также должны быть определены исходя из эмпирических данных [5]. Однако необходимо подчеркнуть, что для выполнения этой задачи необходимо иметь в распоряжении исходные параметры с необходимым уровнем временной точности и пространственного разрешения.

Гауссовская модель является идеальной моделью и, как любая идеальная модель, имеет свои ограничения, помимо допущений, заложенных непосредственно в модель. К таким ограничениям относятся прежде всего возможность проведения расчетов только для плоской и открытой поверхности, т. е. появляются сложности с учетом препятствий и рельефа, а также модель применима только для газов, имеющих плотность, близкую к плотности воздуха [6].

Для случайных выбросов или анализа отдельных случаев рекомендуется модель Лагранжа или модель частиц [3]. Ее основная идея состоит в вычислении траекторий множества частиц, каждая из которых содержит фиксированное количество рассматриваемого загрязняющего вещества. Отдельные траектории складываются под влиянием переноса при средней скорости ветра, а также под влиянием вероятностных нарушений. Из-за элемента вероятности траектории не полностью согласуются, но описывают смесь, возникающую

вследствие турбулентности. В принципе, модели Лагранжа способны описывать сложные метеорологические условия — в частности, ветер и турбулентность; поля (области), рассчитанные с помощью моделей потока, описанных ниже, могут использоваться для моделирования рассеивания по Лагранжу.

Если концентрации загрязняющего вещества необходимо определить на местности со сложным рельефом, при моделировании может быть необходимо учитывать влияние топографических эффектов на рассеивание загрязняющего вещества. К таким эффектам относится, например, перенос, следующий топографической структуре, или термические ветровые системы — морские бризы или горные ветры, изменяющие направление ветра в течение дня.

Если такие эффекты имеют место в более крупном масштабе, чем моделируемая область, то их влияние можно рассматривать, используя метеорологические данные, учитывающие местные особенности. Если таких данных не имеется, то, благодаря использованию соответствующей модели потока, можно получить трехмерную структуру влияния топографических особенностей на воздушный поток. На основании этих данных может быть проведено и собственно моделирование рассеивания при условии допущения горизонтальной однородности, как описано выше в случае гауссовой перьевой модели. Однако в ситуациях, когда условия ветра значительно меняются внутри моделируемой зоны, само моделирование рассеивания должно принимать во внимание влияние топографической структуры на трехмерный воздушный поток. Как уже указывалось, это можно сделать, используя гауссову модель дымового клуба или модель Лагранжа. Другим способом является выполнение более сложного моделирования по Эйлеру.

Для определения направления ветра на местности со сложной структурой рельефа можно использовать моделирование устойчивости массы или диагностического потока [2]. При таком подходе воздушный поток “подгоняется” к особенностям рельефа путем минимальных изменений исходных показателей и сохранения постоянства массы. Поскольку этот подход дает быстрые результаты, он также может быть использован для расчета статистики ветра для участка местности, где невозможны наблюдения. Для этого используются геострофические статистические данные (например, данные из верхних слоев атмосферы, полученные с шаровозондов).

Если все же необходимо рассматривать термальные ветровые системы более подробно, то следует воспользоваться так называемыми прогностическими моделями. В зависимости от величины и рельефа моделируемой местности можно применять гидростатический или даже более сложный негидростатический метод [3]. Модели этого типа требуют сложной компьютерной обработки, а также большого опыта в их применении. С помощью этих моделей определение концентраций на основе среднегодовых показателей, как правило, невозможно. Зато, учитывая лишь одно из направлений ветра и те параметры стратификации, которые приводят к наибольшей поверхностной концентрации загрязнения, можно моделировать ситуацию максимально возможного загрязнения. Если рассчитанные таким образом показатели концентрации загрязнения не превышают стандартов качества воздуха, то в более детальных исследованиях нет необходимости.

Природные (климатические) факторы оказывают существенное влияние и определяют характер распространения загрязняющих веществ в атмосфере.

Совокупность метеорологических факторов, таких как скорость ветра, облачность, вертикальный тепловой поток определяют условия рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере. В зависимости от сочетания этих факторов выделяют шесть классов устойчивости атмосферы: А, В, С, D, Е и F.

Другим важным фактором является ветровой режим территории, который определяется термической неоднородностью и характером подстилающей поверхности [9].

Вертикальный профиль скорости может быть описан логарифмическим уравнением (1) [10-13]

$$u_z = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left(\frac{z - z_d}{z_0} \right), \quad (1)$$

где u_z — средняя скорость ветра, м/с, на высоте z , м; u^* — скорость ветра, возникающая в результате воздействия силы трения, м/с; z_0 — параметр шероховатости, м; z_d — высота смещения нулевой плоскости, м; κ — константа Кармана (обычно принимают равной 0,4).

Параметр шероховатости z_0 — характеристика неровностей подстилающей поверхности, влияющих на движение воздуха в приземном слое атмосферы, имеет размерность длины, иначе называется

уровнем шероховатости. На уровне шероховатости средняя скорость ветра обращается в нуль, ниже этого уровня имеют место только турбулентные пульсации. Высота смещения нулевой плоскости z_d характеризует вертикальное смещение профиля скорости ветра из-за наличия на поверхности элементов шероховатости (рисунок 1). Параметр шероховатости и высота смещения нулевой плоскости в вертикальном профиле скорости ветра над городом выше, чем в пригородных районах и на открытых участках с преобладанием луговой или сельскохозяйственной растительности [13].

Вокруг зданий, особенно имеющих большие габариты, формируется ветровой режим, отличный от окружающей территории и характеризующийся повышенными скоростями ветра и образованием зон турбулентности. Даже при невысоких скоростях фонового ветра его усиление в приземном слое за счет динамической конвекции бывает настолько сильным, что вызывает неблагоприятные и опасные последствия для населения, находящегося на прилегающей к зданию территории, а в отдельных случаях — и для самих зданий и зеленых насаждений [14].

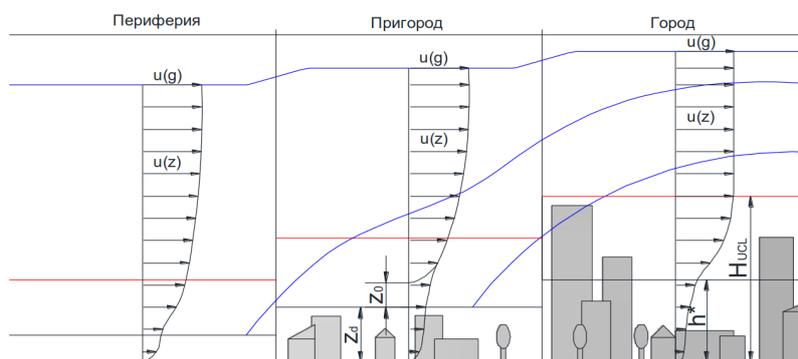


Рисунок 1 — Схематичное представление вертикального профиля скорости ветра над группой элементов шероховатости подстилающей поверхности над городом, его периферией и в пригороде [12, 13]: $u(g)$ — геострофический ветер; $u(z)$ — вертикальный профиль ветра в слое шероховатости; H_{UCL} — высота городского пограничного слоя атмосферы; h^* — средневзвешенная высота препятствий, z_0 — параметр шероховатости, z_d — высота смещения нулевой плоскости.

Надежных количественных оценок изменения параметров воздушного потока (изменение средней скорости в приземном слое) при его прохождении через городскую застройку в зависимости от ее морфологических параметров (высоты, плотности, контрастности) до сих пор не найдено [13].

В настоящее время в Российской Федерации для проведения расчетов рассеивания загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы, носящих нормативный характер, используются Методы-2017 [15], которые являются современным развитием ОНД-86 [16]. Следуя [15], максимальная приземная разовая концентрация загрязняющего вещества, ($\text{мг}/\text{м}^3$), при выбросе газовой смеси из одиночного точечного источника с круглым устьем определяется по формуле (А):

$$c_m = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot t \cdot n \cdot \eta}{H^2 \cdot \sqrt[3]{V_1 \cdot \Delta T}} \quad (\text{А})$$

где A — коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы, определяющий условия горизонтального и вертикального рассеивания загрязняющего вещества в атмосферном воздухе; M — масса загрязняющего вещества, выбрасываемого в атмосферный воздух в единицу времени (мощность выброса), г/с; F — безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания загрязняющих веществ (газообразных и аэрозолей, включая твердые частицы) в атмосферном воздухе; t и n — безразмерные коэффициенты, учитывающие условия выброса из устья источника выброса; η — безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности; H — высота источника выброса, м; V_1 — расход газовой смеси, $\text{м}^3/\text{с}$; ΔT — разность между температурой выбрасываемой газовой смеси T_{Γ} и температурой атмосферного воздуха T_B , °С.

Как видно из (А), единственным параметром, определяющим условия рассеивания в атмосферном воздухе, является коэффициент стратификации A , а для учета влияния застройки и рельефа местности вводятся соответствующие коэффициенты.

Так Методы-2017 в разделе IX Метод расчета рассеивания выбросов ЗВ в атмосферном воздухе с учетом влияния застройки (а ранее и ОНД-86) определяют, для каких зданий с учетом взаимного расположения источника выбросов и здания требуется проводить расчет с учетом влияния застройки. Так не подлежат учету здания и сооружения высотой менее 5 м, а также здания и сооружения, максимальный линейный размер которых по горизонтали не превышает 10 м.

Все рассматриваемые здания аппроксимируются прямоугольными параллелепипедами, а здания, имеющие сложную форму, аппроксимируются несколькими параллелепипедами (рисунок 2).

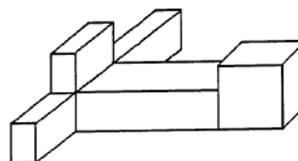


Рисунок 2 — Аппроксимация зданий сложной формы.

Для каждого здания выделяют три зоны ветровых теней (рисунок 3):

- зона подветренной тени (зона I);
- зона крышной тени (зона II);
- зона наветренной тени или зона подпора (зона III);

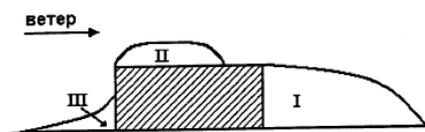


Рисунок 3 — Ветровые тени здания:

- I — зона подветренной тени; II — зона крышной тени; III — зона наветренной тени или зона подпора

На рисунке 3 штриховкой обозначено сечение здания, проведенное вдоль направления ветра, сплошными линиями обозначены границы зон ветровых теней I, II и III.

В дальнейшем весь расчет сводится к определению поправки $\widehat{\eta}_m$ в уравнении (2) для максимальной концентрации с учетом застройки

$$\widehat{C}_m = C_m \cdot \widehat{\eta}_m, \quad (2)$$

где C_m — максимальная концентрация ЗВ, полученная без учета влияния застройки; $\widehat{\eta}_m$ — поправка, учитывающая влияние застройки.

В Разделе VII Методов–2017 «Учет влияния рельефа местности при расчете рассеивания выбросов ЗВ в атмосферном воздухе» определяется, каким образом в расчетах рассеивания учитывается рельеф местности.

Влияние рельефа местности на максимальную приземную концентрацию C_m ЗВ от одиночного точечного источника выброса учитывается безразмерным коэффициентом η . В случае ровной или слабопересеченной местности с перепадом высот, не превышающим 50 м на 1 км, $\eta = 1$.

Если перепад высот превышает 50 м на 1 км, то коэффициент η устанавливается на основе анализа картографического материала, характеризующего рельеф местности в окрестности радиусом $R=50 \cdot H_m$, где H_m — высота наиболее высокого из источников выбросов, расположенных на одном или нескольких земельных участках, в пределах которых расположен конкретный объект, оказывающий негативное воздействие на окружающую среду (далее — промплощадка). При этом R не должно быть менее 2 км.

В качестве характерных объектов рельефа местности выделяют гряду, гребень, холм, ложбину, долину, котловину, впадину и уступ (рисунок 4), где h_0 — высота (глубина) характерного

объекта рельефа; a_0 — полуширина характерного объекта рельефа; x_0 — расстояние до источника выброса.

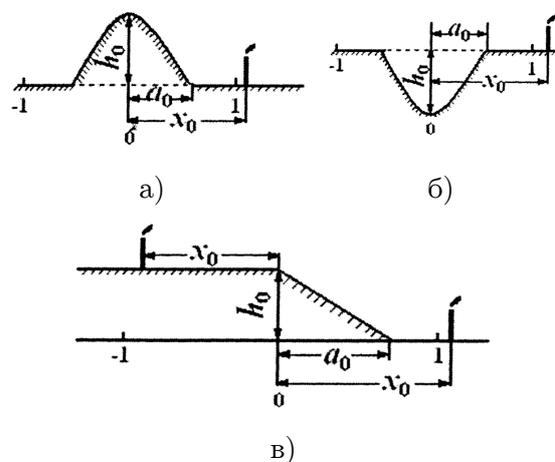


Рисунок 4 — Характерные объекты рельефа местности и варианты расположения источников выбросов: а) гряда, гребень, холм; б) ложбина, долина, котловина, впадина; в) уступ

Математическая постановка задачи

Рассмотрим математическую постановку задачи и математическую модель процессов теплопереноса в приземных слоях атмосферы, основанную на уравнениях вычислительной гидродинамики (*computational fluid dynamics – CFD*).

Моделирование дисперсии и граничных условий для CFD моделей изучены в работах [17, 18]. Городской микроклимат очень динамичен в пределах приземного пограничного слоя атмосферы и на него оказывают существенное влияние различного рода пространственные препятствия и тепловые свойства зданий, дорог, растительности, водоемов и т. д. [19]. В частности, характер ветрового потока в городе может быть очень сложен для моделирования, что связано с формированием внутри застройки застойных и/или рециркуляционных зон [20], что, в свою очередь, влияет на рассеивание загрязняющих веществ [21].

Приземный пограничный слой атмосферы — это самая нижняя область тропосферы, которая находится под

непосредственным влиянием земной поверхности и подвержена резким изменениям температуры, скорости и направления ветра, влажности и высоты слоя перемешивания [22]. Рассеяние загрязняющих веществ в этом слое в основном определяется классом устойчивости атмосферы (классы А-Г: от чрезвычайно нестабильного до чрезвычайно стабильного) и высотой перемешивания по вертикали [23], а конфигурация зданий играет важную роль в определении рассеивания загрязняющих веществ на микроуровне [24].

В качестве системы уравнений для моделирования загрязнения приземных слоев атмосферного воздуха используются уравнения Навье-Стокса, осреднённые по Рейнольдсу (RANS)

Математическая модель тепломассопереноса в приземных слоях атмосферы состоит из системы нелинейных основных дифференциальных уравнений в частных производных (законов сохранения массы, импульса и энергии) и дополнительных уравнений, необходимых для ее замыкания, и в целом аналогична системе уравнений, описанных в [25], которые необходимо дополнить соответствующими начальными и граничными условиями.

Обсуждение результатов

Необходимо отметить, что используемое для проведения моделирования свободное программное обеспечение применяется для решения широкого спектра задач, в том числе, для исследования и анализа ветрового режима территорий. OpenFOAM имеет в составе стандартных граничных условий базовый класс `atmBoundaryLayer` для обработки граничных условий на входе, обеспечивая граничные условия на входе по нормали к земле по логарифмическому закону для скорости ветра и величин турбулентности для однородного, двумерного, сухого воздуха, равновесного и нейтрального

атмосферного пограничного слоя, который позволяет использовать соответствующие граничные условия на входе в расчетную область, при этом изменение профиля скорости и характеристики турбулентности могут легко корректироваться в случае необходимости [26]. Другой, также свободный программный продукт, FDS тоже позволяет использовать несколько моделей граничных условий для атмосферных течений, включая профили скорости и температуры, основанные на теории подобия Мони́на-Обухова [27].

Геометрия расчетной области для атмосферных течений, в отличие от геометрии производственных цехов, не ограничена стенами или другими непроницаемыми преградами. В связи с этим одним из первых вопросов, который встает перед исследователями, является, какими должны быть размеры расчетной области и как они соотносятся с размерами исследуемой модели. В настоящее время нет однозначного ответа на этот вопрос. Однако все сходятся во мнении, что течение на границах расчетной области не должно оказывать влияние на течение внутри исследуемой модели и предлагают располагать исследуемую область (рисунок 5) на расстоянии не менее пяти высот от передней (входной) и боковых границ, не менее пятнадцати высот от задней (выходной) границы, а верхнюю границу устанавливать на расстоянии не менее пяти-шести высот самого высокого здания исследуемой модели [28-33].

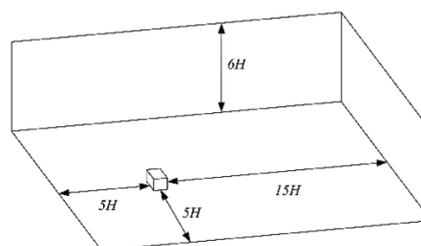


Рисунок 5 — Граница расположения расчетной области (H — высота самого высокого здания исследуемой модели)

На первом этапе целесообразно рассмотреть создание расчетных сеток для исследования обтекания ветровым потоком отдельных зданий. На рисунке 6 представлена 3D-модель и расчетная сетка для здания, длинная сторона которого расположена параллельно набегающему потоку ветра, построенные в программе FDS.

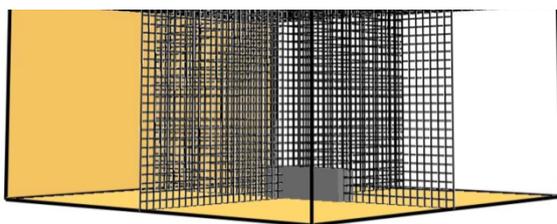


Рисунок 6 — Модель отдельно стоящего здания

На рисунке 7 представлена геометрическая модель одного из кварталов плотной городской застройки города Москвы

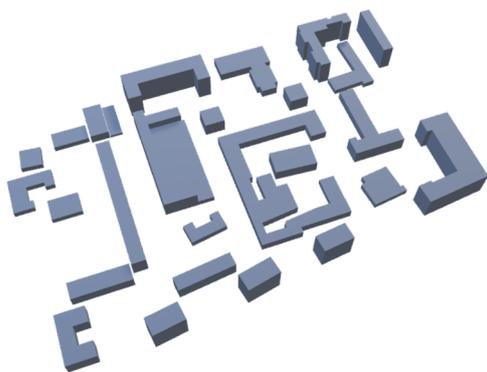


Рисунок 7 — 3D-модель городского квартала.

Следующим шагом необходимо создание расчетной сетки. Для зоны, входящей в пределы интересующей области, строится поверхностная сетка, соответствующая исследуемому участку. Сетка должна быть более «мелкой» в зонах с большими градиентами исследуемых переменных.

Результат построения расчетной сетки с использованием утилиты snappyHexMesh (OpenFOAM) представлен на рисунке 8.

Особенности сложного рельефа местности учитываются аналогичным образом. На рисунке 9 представлены 3D-модели характерных объектов рельефа местности.

Перед расчетами рассеивания загрязняющих веществ целесообразно провести аэродинамические расчеты, чтобы оценить ветровой режим в непосредственной близости как у одиночных зданий, так и в плотной застройке, и на местности со сложным рельефом.

На рисунке 10 представлены поля скоростей около отдельно стоящего здания, расположенного параллельно направлению ветра. На рисунке 11 показан вертикальный разрез, построенный по оси симметрии здания, на котором видны три зоны ветровых теней: зона подветренной тени, зона крышной тени и зона наветренной тени или зона подпора.

На рисунке 12 представлены поля скоростей около отдельно стоящего здания, расположенного перпендикулярно направлению ветра.

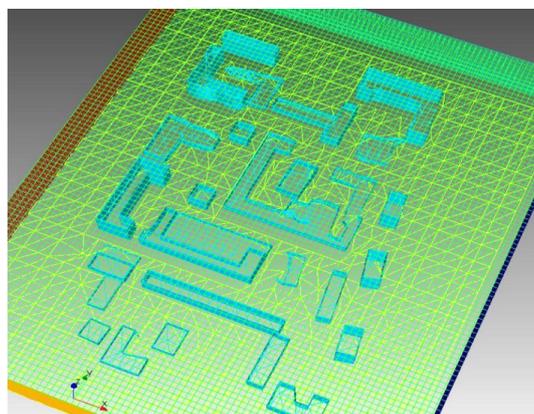


Рисунок 8 — Расчетная сетка.

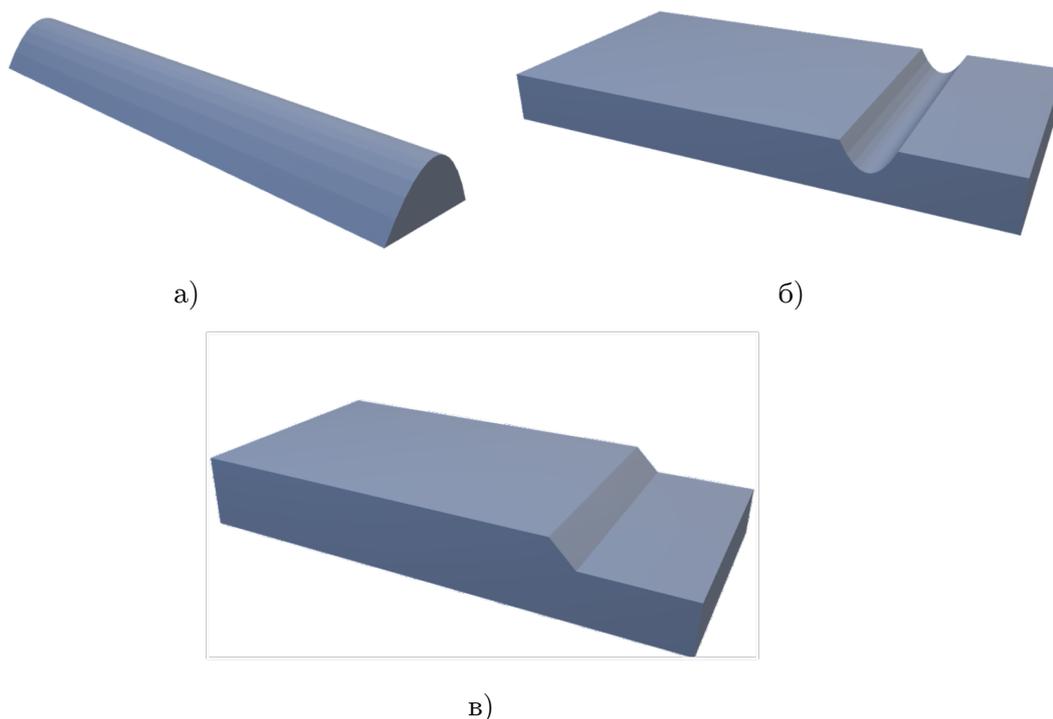


Рисунок 9 — 3D-модели характерных объектов рельефа местности: а) гряда, гребень, холм; б) ложбина, долина, котловина, впадина; в) уступ

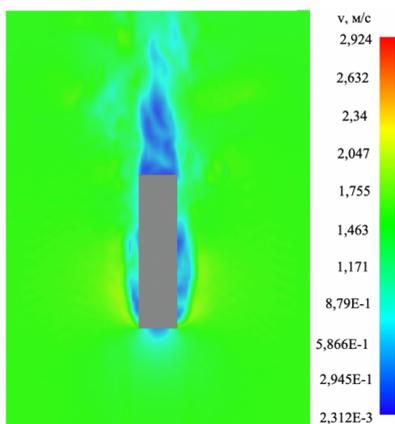


Рисунок 10 — Поля скоростей около отдельно стоящего здания, расположенного параллельно направлению ветра

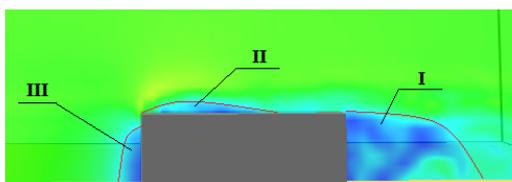
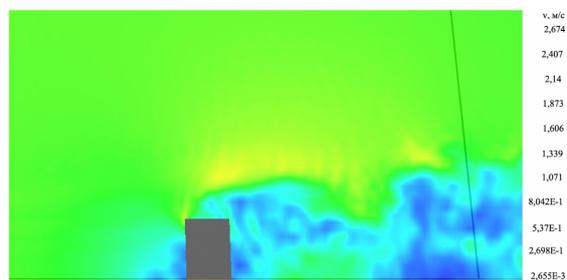
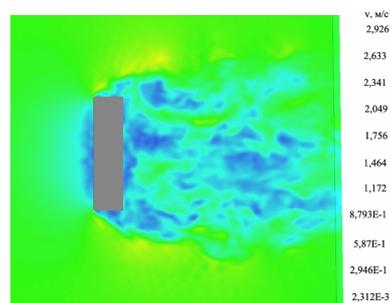


Рисунок 11 — Ветровые тени на модели здания: I — зона подветренной тени; II — зона крышной тени; III — зона наветренной тени или зона подпора;



а)



б)

Рисунок 12 — Поля скоростей (м/с) около отдельно стоящего здания, расположенного перпендикулярно направлению ветра: а) вертикальный разрез; б) горизонтальный разрез на уровне 4 м от поверхности Земли.

На рисунке 13 представлен горизонтальный разрез векторного поля скоростей около отдельно стоящего здания, расположенного перпендикулярно направлению ветра, на высоте 4 метра от поверхности земли, на котором отчетливо видны застойные и рециркуляционные зоны.

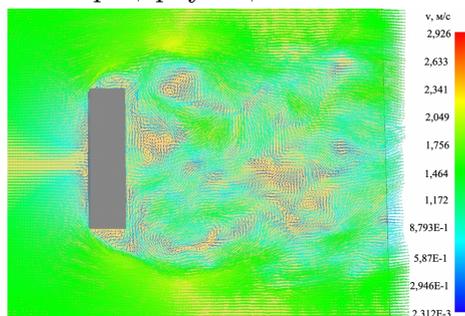


Рисунок 13 — Векторное поле скорости на высоте 4 метра около отдельно стоящего здания, расположенного перпендикулярно направлению ветра.

В результате расчетов с использованием модели городского квартала получены характеристики ветрового режима внутри городского квартала. Некоторые

результаты расчетов представлены на рисунке 14.

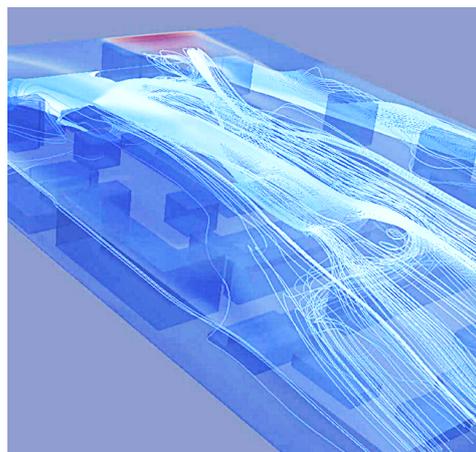


Рисунок 14 — Линии тока внутри городского квартала при северном направлении ветра.

Температура газовой смеси равна температуре окружающей среды и составляет 20°C. Средняя скорость ветра, имеющего профиль, характерный для приземного пограничного слоя, также принята равной 1,5 м/с.

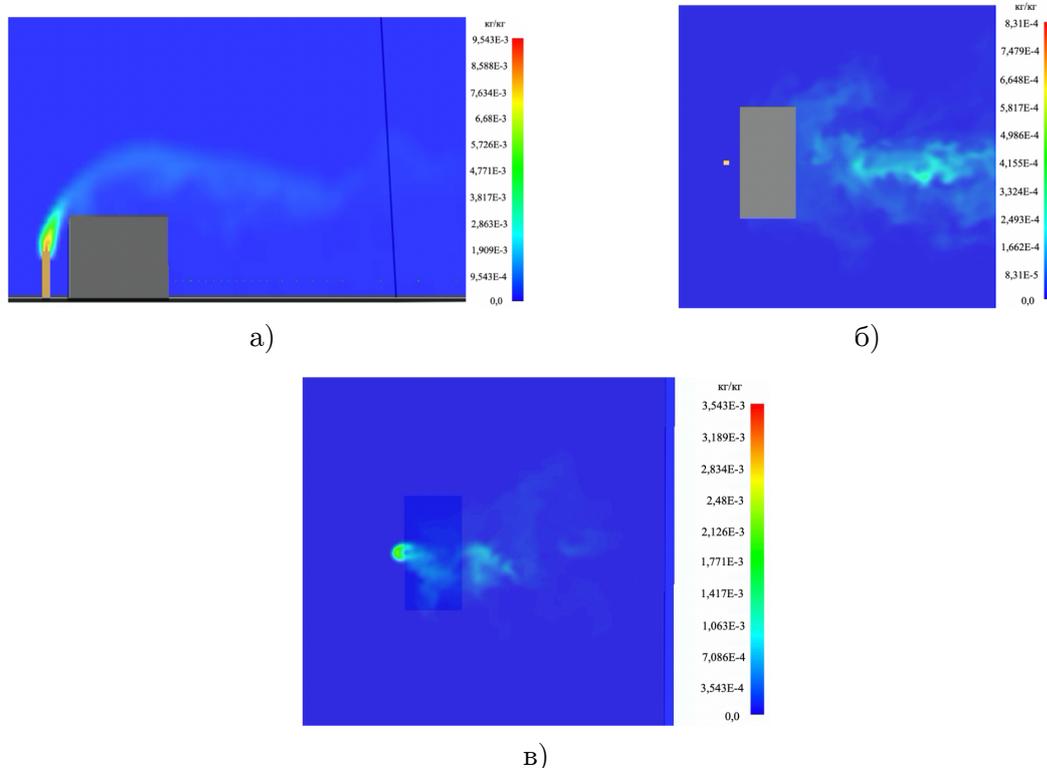


Рисунок 15 — Поле расчетной концентрации ацетона (кг/кг): а) вертикальный разрез; б) горизонтальный разрез на высоте 2 метра от поверхности Земли; в) горизонтальный разрез на высоте 9 метров от поверхности Земли

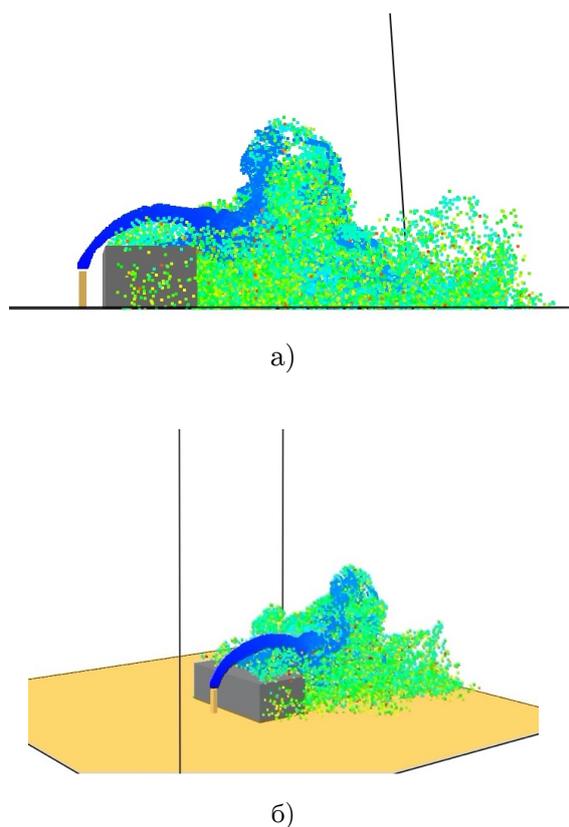


Рисунок 16 — Визуализация области распространения (факела выброса) ацетона: а) визуализация области распространения (факела выброса) ацетона (вертикальная плоскость); б) визуализация области распространения (факела выброса) ацетона (3D).

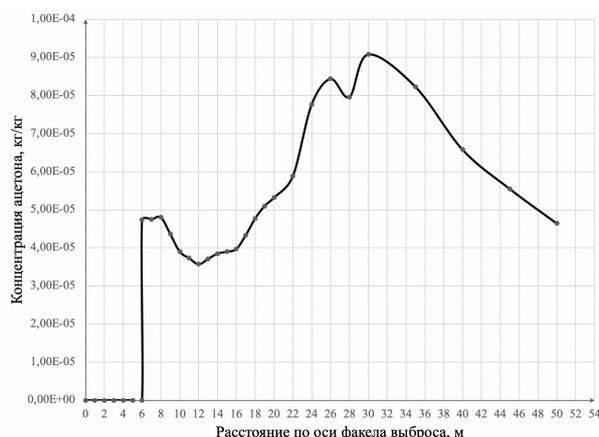


Рисунок 17 — Концентрации загрязняющих веществ на высоте 2 м над уровнем Земли по оси факела выброса.

На рисунках 15 и 16 представлены поля расчетных концентраций и визуализация области распространения (факела выброса) ацетона. На рисунке 17 показано распределение концентраций ацетона на высоте 2 м от поверхности Земли по оси факела выброса за зданием общей шириной 12 метров (стена здания расположена на отметке 6 м по оси абсцисс).

Закключение

Представленные результаты расчетов наглядно показывают сложный характер распределения полей концентраций в непосредственной близости от зданий, а также в условиях плотной застройки и сложного рельефа местности. Моделирование такого сложного распределения практически невозможно без использования мощного аппарата вычислительной гидродинамики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Б. Бретшнайдер, И. Курфюрст ; перевод с английского Н. Г. Вашкевич; под редакцией А. Ф. Туболкина. Охрана воздушного бассейна от загрязнений : Технология и контроль Ленинград : Химия : Ленингр. отд-ние, 1989, 287 с.
- [2]. Pielke R. A. Mesoscale Meteorological Modeling. New York : Academic Press, 1984, 612 p.
- [3]. VDI Guideline 3945. Part 1. Environmental meteorology - Atmospheric dispersion models; Gaussian Puff Model . – Technical Division Environmental Meteorology, 1996, 36 p.
- [4]. Venkatram A., Wyngaard J. C. Lectures on Air Pollution Modeling Boston, MA : American Meteorological Society, 1988, 390 p.
- [5]. VDI Guideline 3945. Part 3. Environmental meteorology - Atmospheric dispersion models - Particle model. – Technical Division Environmental Meteorology, 2000, 60 p.

- [6]. Мешалкин В. П., Бутусов О. Б. Компьютерная оценка воздействия на окружающую среду магистральных трубопроводов. Москва : ИНФРА-М, 2020, 449 с.
- [7]. User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models, Volume 1 User Instructions : Volume 1. Environmental Protection Agency, 1995, 391 p.
- [8]. User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models, Volume 2 Description of Model Algorithms : Volume II. Environmental Protection Agency, 1995, 129 p.
- [9]. Дуничкин, И. В. Особенности аэрационного режима жилой застройки при развитии и реконструкции: На примере пятиэтажной застройки Москвы 1950-60-х годов, не подлежащей сносу : специальность 18.00.04 «Градостроительство, планировка сельскохозяйственных населенных пунктов»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук; Московский государственный строительный университет. Москва, 2005, 217 с.
- [10]. Bottema M., Mestayer P. G. Urban roughness mapping—validation techniques and some first results. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1998, № 74, pp. 163-173.
- [11]. Bottema M. Aerodynamic roughness parameters for homogeneous building groups : part 2: results : Document SUB-MESO 23. Nantes : Ecole Centrale De Nantes, 1995, 80 p.
- [12]. Oke T. R. Boundary Layer Climates. London : Routledge, 1992, 435 p.
- [13]. Попова И. В. Методика геоэкологической оценки комфортности городской среды с учетом микроклиматических особенностей : специальность 25.00.36 «Геоэкология»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук; Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Воронеж, 2019, 198 с.
- [14]. Gandemer, J. Wind environment around buildings: aerodynamic concepts. *International Conference on wind effects on buildings and structures : Proceedings, 4.* – Cambridge : Cambridge University Press, 1977. – P. 423-432.
- [15]. Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе: [утверждены приказом Минприроды России от 6 июня 2017 года N 273: подлежат применению с 1 января 2018 года]. – Текст: электронный. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456074826> (дата обращения: 04.08.2020).
- [16]. Общесоюзный нормативный документ. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ содержащихся в выбросах предприятий (ОНД-86) [не подлежит применению]. Ленинград : Гидрометеоздат, 1987, 92 с.
- [17]. Leitl B. M. Meroney R. N. Car exhaust dispersion in a street canyon. Numerical critique of a wind tunnel experiment. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, Vols. 67—68, P. 293-304. DOI: 10.1016/S0167-6105(97)00080-9
- [18]. F. Gonzalez Olivardia, Q. Zhang, T. Matsuo [et al.]. Analysis of Pollutant Dispersion in a Realistic Urban Street Canyon Using Coupled CFD and Chemical Reaction Modeling. *Atmosphere*, 2019, Vol. 10, № 9, pp. 479. DOI: 10.3390/atmos10090479
- [19]. Blocken B., Stathopoulos T., Carmeliet J. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function

problems. *Atmospheric Environment*, 2007, Vol. 41, № 2, pp. 238-252.

DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.08.019

[20]. M. Piringer, S. Joffre, A. Baklanov [et al.]. The surface energy balance and the mixing height in urban areas—activities and recommendations of COST-Action 715. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, Vol. 124, № 1, pp. 3-24. DOI 10.1007/s10546-007-9170-0

[21]. Chang C.-H., Meroney R. N. Numerical and physical modeling of bluff body flow and dispersion in urban street canyons. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001, Vol. 89, № 14-15, pp. 1325-1334.

DOI: 10.1016/S0167-6105(01)00129-5

[22]. Bonner C. S., Ashley M. C. B., Cui X., [et al.]. Thickness of the Atmospheric Boundary Layer Above Dome A, Antarctica, during 2009. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2010, Vol. 122, № 895, pp. 1122-1131.

DOI: 10.1086/656250

[23]. Pul W. A. J. Van, Holtslag A. A. M., Swart D. P. J. A comparison of ABL heights inferred routinely from lidar and radiosondes at noontime. *Boundary-Layer Meteorology*, 1994, Vol. 68, № 1-2, pp. 173-191.

DOI: 10.1007/BF00712670

[24]. Huq P., Franzese P. Measurements of Turbulence and Dispersion in Three Idealized Urban Canopies with Different Aspect Ratios and Comparisons with a Gaussian Plume Model. *Boundary-Layer Meteorology*, 2013, Vol. 147, № 1, pp. 103-121. DOI 10.1007/s10546-012-9780-z

[25]. Akhatova A., Kassymov A., Kazmaganbetova M., Rojas-Solórzano L. R. CFD Simulation of the Dispersion of Exhaust Gases in a Traffic Loaded Street of Astana, Kazakhstan. *Journal of Urban and*

Environmental Engineering, 2016, Vol. 9, № 2, pp. 158-166.

DOI 10.4090/juee.2015.v9n2.158166

[26]. Stoll R., Porté-Agel F. Large-Eddy Simulation of the Stable Atmospheric Boundary Layer using Dynamic Models with Different Averaging Schemes. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, Vol. 126, № 1, pp. 1-28. DOI: 10.1007/s10546-007-9207-4

[27]. Obukhov A. M. Turbulence in an atmosphere with a non-uniform temperature. *Boundary-Layer Meteorology*, 1971, Vol. 2, № 1, pp. 7-29. DOI: 10.1007/BF00718085

[28]. Dhunny A., Toja-Silva F., Peralta C., [et al.]. Computational fluid dynamics simulation and full-scale experimental model inter-comparison of the wind flow around a university campus. *Wind Engineering*, 2017, Vol. 41, № 1, pp. 43-54. DOI: 10.1177/0309524X16666460

[29]. Okafor C. V., Ezeokonkwo U. J., Obodoh D. A., Ogunoh P. Atmospheric Boundary Layer Simulation Using Wall Function Approach in OpenFoam CFD Software. *European Journal of Engineering Research and Science*, 2018, Vol. 3, № 2, pp. 1. DOI: 10.24018/ejers.2018.3.2.597

[30]. Antoniou N., Montazeri H., Wigo H., [et al.]. CFD and wind-tunnel analysis of outdoor ventilation in a real compact heterogeneous urban area: Evaluation using “air delay”. *Building and Environment*, 2017, Vol. 126, pp. 355-372. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.10.013

[31]. So E. S. P., Chan A. T. Y., Wong A. Y. T. Large-eddy simulations of wind flow and pollutant dispersion in a street canyon. *Atmospheric Environment*, 2005, Vol. 39, № 20, pp. 3573-3582. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2005.02.044

[32]. Watakabe M., Ohashi M., Okada H., [et al.]. Comparison of wind pressure measurements on tower-like structure obtained from full-scale

observation, wind tunnel test, and the CFD technology. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, Vol. 90, № 12-15, pp. 1817-1829.

DOI: 10.1016/S0167-6105(02)00290-8

[33]. Tamura T., Nozawa K., Kondo K. AIJ guide for numerical prediction of wind loads on buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, Vol. 96, № 10-11, pp. 1974-1984.

DOI: 10.1016/j.jweia.2008.02.020

Седяров Олег Иванович — канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Энергоресурсоэффективные технологии, промышленная экология и безопасность» Российского государственного университета им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1).

Бородина Елена Сергеевна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергоресурсоэффективные технологии, промышленная экология и безопасность» Российского государственного университета им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1).

Modeling the dispersion of pollutants in the surface layer of the atmosphere, taking into account the influence of buildings and terrain

O. I. Sedlyarov^{*,1}, E. S. Borodina^{*}

** The Kosygin State University of Russia, Moscow, Russia*

Abstract

Traditionally, the assessment of atmospheric air pollution is done on the basis of data on pipe heights, temperature, velocity, volume and specific properties of the ejected aerosol, corrected for the prevailing wind direction and other changes. The tolerances of this technique are very large: as a rule, these are average weather conditions and a single source. The dispersion of pollutants depends on the conditions of their emission, transfer and turbulent mixing. The paper considers the characteristics that affect the stability of the surface layers of the atmosphere and determine the processes of turbulent transport.

In this paper, we propose a method for calculating the dispersion of pollutants in the surface layer of the atmosphere, based on the methods of computational fluid dynamics. The use of this technique makes it possible to take into account the influence of complex terrain and the nature of development. As an example of calculating the spread of pollutants, the paper considers the calculation of acetone emissions from a separate source located in the immediate vicinity of the building. The presented results of calculations clearly show the complex nature of the distribution of concentration fields in the immediate vicinity of buildings, as well as in conditions of dense buildings and complex terrain. Modeling such a complex distribution is practically impossible without the use of a powerful apparatus of computational fluid dynamics.

Keywords

Dispersion of pollutants, atmospheric pollution, computer modeling, computational fluid dynamics, wind regime of the territory, complex terrain, influence of development

REFERENCES

- [1]. Bretshnayder B., Kurfyurst I. Okhrana vozdušnogo basseyna ot zagryazneniy: Tekhnologiya i kontrol' [Protection of the air basin from pollution: Technology and control]. Leningrad : Khimiya Publ.: Leningr. otd-niye, 1989, 287 p. (In Russ.)
- [2]. Pielke R. A. Mesoscale Meteorological Modeling. New York : Academic Press, 1984, 612 p.
- [3]. VDI Guideline 3945. Part 1. Environmental meteorology - Atmospheric dispersion models; Gaussian Puff Model . –

¹ *Corresponding author:*

Email: sedlyarov-oi@rguk.ru

Technical Division Environmental Meteorology, 1996, 36 p.

[4]. Venkatram A., Wyngaard J. C. Lectures on Air Pollution Modeling Boston, MA : American Meteorological Society, 1988, 390 p.

[5]. VDI Guideline 3945. Part 3. Environmental meteorology - Atmospheric dispersion models - Particle model. – Technical Division Environmental Meteorology, 2000, 60 p.

[6]. Meshalkin V. P., Butusov O. B. Komp'yuternaya otsenka vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu magistral'nykh truboprovodov [Computer environmental impact assessment of main pipelines]. Moscow : INFRA-M Publ., 2020, 449 p. (In Russ.)

[7]. User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models, Volume 1 User Instructions: Volume 1. Environmental Protection Agency, 1995, 391 p.

[8]. User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models, Volume 2 Description of Model Algorithms: Volume II. Environmental Protection Agency, 1995, 129 p.

[9]. Dunichkin I. V. Osobennosti aeratsionnogo rezhima zhiloy zastroyki pri razvitiy i rekonstruktsii: Na primere pyatietazhnoy zastroyki Moskvy 1950-60 godov, ne podlezhashchey snosu [Features of the aeration regime of residential buildings during development and reconstruction: On the example of a five-story building in Moscow in the 1950s-60s, not subject to demolition] : PhD thesis; Moskovskiy gosudarstvennyy stroitel'nyy universitet [Moscow State Construction University]. Moscow, 2005, 217 p. (In Russ.)

[10]. Bottema M., Mestayer P. G. Urban roughness mapping—validation techniques and some first results. Journal of

Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, № 74, pp. 163-173.

[11]. Bottema M. Aerodynamic roughness parameters for homogeneous building groups: part 2: results: Document SUB-MESO 23. Nantes : Ecole Centrale De Nantes, 1995, 80 p.

[12]. Oke T. R. Boundary Layer Climates. London : Routledge, 1992, 435 p.

[13]. Popova I. V. Metodika geoeekologicheskoy otsenki komfortnosti gorodskoy sredy s uchetom mikroklimaticheskikh osobennostey [Methodology of geoeological assessment of the comfort of the urban environment, taking into account microclimatic features]: PhD thesis; Voenno-vozdushnaya akademiya imeni professora N. Ye. Zhukovskogo i Yu. A. Gagarina [Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin], Voronezh, 2019, 198 p. (In Russ.)

[14]. Gandemer, J. Wind environment around buildings: aerodynamic concepts. International Conference on wind effects on buildings and structures : Proceedings, 4. – Cambridge : Cambridge University Press, 1977. – P. 423-432.

[15]. Metody raschetov rasseivaniya vybrosov vrednykh (zagryaznyayushchikh) veshchestv v atmosfernom vozdukh: (utverzhdeny prikazom Minprirody Rossii ot 6 iyunya 2017 goda N 273: podlezhat primeniyu s 1 yanvarya 2018 goda) [Methods for calculating the dispersion of emissions of harmful (polluting) substances in the atmospheric air: (approved by order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated June 6, 2017 N 273: to be applied from January 1, 2018)]. – Text: electronic. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456074826> (date of access: 08/04/2020). (In Russ.)

[16]. Obshchesoyuznyy normativnyy dokument. Metodika rascheta kontsentratsiy v atmosfernom vozdukh vrednykh

veshchestv soderzhashchikhsya v vybrosakh predpriyatiy (OND-86) (ne podlezhit primeneniyu) [All-Union normative document. Methodology for calculating the concentrations in the atmospheric air of harmful substances contained in the emissions of enterprises (OND-86) (is not applicable)]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1987, 92 p.

[17]. Leitl B. M. Meroney R. N. Car exhaust dispersion in a street canyon. Numerical critique of a wind tunnel experiment. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, Vols. 67—68, P. 293-304.

DOI: 10.1016/S0167-6105(97)00080-9

[18]. F. Gonzalez Olivardia, Q. Zhang, T. Matsuo [et al.]. Analysis of Pollutant Dispersion in a Realistic Urban Street Canyon Using Coupled CFD and Chemical Reaction Modeling. *Atmosphere*, 2019, Vol. 10, № 9, pp. 479.

DOI: 10.3390/atmos10090479

[19]. Blocken B., Stathopoulos T., Carmeliet J. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. *Atmospheric Environment*, 2007, Vol. 41, № 2, pp. 238-252.

DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.08.019

[20]. M. Piringer, S. Joffre, A. Baklanov [et al.]. The surface energy balance and the mixing height in urban areas—activities and recommendations of COST-Action 715. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, Vol. 124, № 1, pp. 3-24. DOI 10.1007/s10546-007-9170-0

[21]. Chang C.-H., Meroney R. N. Numerical and physical modeling of bluff body flow and dispersion in urban street canyons. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001, Vol. 89, № 14-15, pp. 1325-1334.

DOI: 10.1016/S0167-6105(01)00129-5

[22]. Bonner C. S., Ashley M. C. B., Cui X., [et al.]. Thickness of the Atmospheric Boundary Layer Above Dome A, Antarctica, during 2009. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2010, Vol. 122, № 895, pp. 1122-1131.

DOI: 10.1086/656250

[23]. Pul W. A. J. Van, Holtslag A. A. M., Swart D. P. J. A comparison of ABL heights inferred routinely from lidar and radiosondes at noontime. *Boundary-Layer Meteorology*, 1994, Vol. 68, № 1-2, pp. 173-191.

DOI: 10.1007/BF00712670

[24]. Huq P., Franzese P. Measurements of Turbulence and Dispersion in Three Idealized Urban Canopies with Different Aspect Ratios and Comparisons with a Gaussian Plume Model. *Boundary-Layer Meteorology*, 2013, Vol. 147, № 1, pp. 103-121. DOI 10.1007/s10546-012-9780-z

[25]. Akhatova A., Kassymov A., Kazmaganbetova M., Rojas-Solórzano L. R. CFD Simulation of the Dispersion of Exhaust Gases in a Traffic Loaded Street of Astana, Kazakhstan. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 2016, Vol. 9, № 2, pp. 158-166.

DOI 10.4090/juee.2015.v9n2.158166

[26]. Stoll R., Porté-Agel F. Large-Eddy Simulation of the Stable Atmospheric Boundary Layer using Dynamic Models with Different Averaging Schemes. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, Vol. 126, № 1, pp. 1-28. DOI: 10.1007/s10546-007-9207-4

[27]. Obukhov A. M. Turbulence in an atmosphere with a non-uniform temperature. *Boundary-Layer Meteorology*, 1971, Vol. 2, № 1, pp. 7-29. DOI: 10.1007/BF00718085

[28]. Dhunny A., Toja-Silva F., Peralta C., [et al.]. Computational fluid dynamics simulation and full-scale experimental model inter-comparison of the wind flow around a university campus. *Wind*

Engineering, 2017, Vol. 41, № 1, pp. 43-54.
DOI: 10.1177/0309524X16666460

[29]. Okafor C. V., Ezeokonkwo U. J., Obodoh D. A., Ogunoh P. Atmospheric Boundary Layer Simulation Using Wall Function Approach in OpenFoam CFD Software. European Journal of Engineering Research and Science, 2018, Vol. 3, № 2, pp. 1. DOI: 10.24018/ejers.2018.3.2.597

[30]. Antoniou N., Montazeri H., Wigo H., [et al.]. CFD and wind-tunnel analysis of outdoor ventilation in a real compact heterogeneous urban area: Evaluation using “air delay”. Building and Environment, 2017, Vol. 126, pp. 355-372. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.10.013

[31]. So E. S. P., Chan A. T. Y., Wong A. Y. T. Large-eddy simulations of wind flow and pollutant dispersion in a street

canyon. Atmospheric Environment, 2005, Vol. 39, № 20, pp. 3573-3582. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2005.02.044

[32]. Watakabe M., Ohashi M., Okada H., [et al.]. Comparison of wind pressure measurements on tower-like structure obtained from full-scale observation, wind tunnel test, and the CFD technology. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, Vol. 90, № 12-15, pp. 1817-1829.

DOI: 10.1016/S0167-6105(02)00290-8

[33]. Tamura T., Nozawa K., Kondo K. AIJ guide for numerical prediction of wind loads on buildings. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, Vol. 96, № 10-11, pp. 1974-1984.

DOI: 10.1016/j.jweia.2008.02.020

Sedlyarov O. I. — Cand. Sc. (Eng.), Head of Department of Energy and Resource Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya ul. 1, Moscow, 119071 Russian Federation).

Borodina E. S. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Energy and Resource Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya ul. 1, Moscow, 119071 Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Моделирование распространения загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы с учетом влияния застройки и рельефа местности / О. И. Седляров, Е. С. Бородина // Промышленные процессы и технологии. 2022. Т. 2. № 2(4). С. 8-25

DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-2(4)-8-25

Please cite this article as:

Sedlyarov O. I., Borodina E. S. Modeling the dispersion of pollutants in the surface layer of the atmosphere, taking into account the influence of buildings and terrain. Industrial processes and Technologies, 2022, vol. 2, no. 2(4), pp. 8-25.

DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-2(4)-8-25