

Читать
онлайн
Read
online

Балакин В.В., Алексиков С.В., Азаров В.Н.

Обеспечение качества атмосферного воздуха на магистральных улицах и в жилой застройке средствами планировки и озеленения

Институт архитектуры и строительства ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет»
Министерства образования и науки Российской Федерации, 400074, Волгоград, Россия

Введение. Уровень концентрации токсичных веществ в атмосферном воздухе магистральных улиц в значительной мере определяется их аэрационным режимом, устанавливаемым в результате воздействия на воздушный поток застройки и зелёных насаждений. Поэтому при разработке генеральных планов городов и проектов детальной планировки жилых образований для обеспечения гигиенических нормативов ожидаемого содержания выбросов автомобильного транспорта в воздухе транспортных коммуникаций и прилегающей жилой застройки следует учитывать влияние градостроительных факторов на скорость и направление ветра.

Цель исследования — обоснование и выбор градостроительных мероприятий для снижения загрязнения атмосферного воздуха магистральных дорог и улиц отработавшими газами автомобильного транспорта.

Материалы и методы. Натурные обследования объектов транспортной инфраструктуры в крупных городах и моделирование процессов рассеяния отработавших газов автомобилей в воздухе с использованием моделей жилых зданий и зелёных насаждений.

Результаты. Установлены закономерности формирования режима аэрации городских улиц и рассеяния выбросов автомобилей за полосами озеленения и в жилой застройке. Определены оптимальные варианты планировки, застройки и озеленения магистральных улиц, обеспечивающие снижение загазованности пешеходных зон, общественных пространств и территории жилых образований.

Ограничения исследования. Выбор объектов озеленения городских дорог и улиц для натурных наблюдений и моделирования процессов рассеяния выбросов автомобилей ограничивается полосами зелёных насаждений продуваемой и плотной конструкции без учёта особенностей трансформации воздушного потока и снижения загазованности под воздействием полос озеленения ажурной конструкции.

Заключение. Снижение загазованности магистральных дорог и улиц обеспечивается путём выбора направления трассы и приёмами планировки и застройки. Необходимо также использование средозащитных линейно-полосных объектов озеленения оптимальной конструкции. При этом следует учитывать, что фронтальная многосекционная застройка и полосы зелёных насаждений непродуваемой плотной конструкции стимулируют появление устойчивых вихрей с замкнутой циркуляцией примесей в уличных каньонах и на участках автомобильных дорог. При выборе градостроительных решений для обеспечения качества атмосферного воздуха транспортных коммуникаций и прилегающей жилой застройки в различных ландшафтно-климатических условиях необходимо учитывать специфику возникающих при этом задач регулирования режима аэрации и мелиорации микроклимата в целом.

Ключевые слова: городская улица; выбросы автомобилей; жилая территория; скорость ветра; аэрационный режим; зелёные насаждения; качество атмосферного воздуха

Соблюдение этических стандартов. Исследование не требует представления заключения комитета по биомедицинской этике или иных документов.

Для цитирования: Балакин В.В., Алексиков С.В., Азаров В.Н. Обеспечение качества атмосферного воздуха на магистральных улицах и в жилой застройке средствами планировки и озеленения. *Гигиена и санитария*. 2023; 102(7): 639–647. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-7-639-647> <https://elibrary.ru/xvddito>

Для корреспонденции: Балакин Владимир Васильевич, канд. техн. наук, доцент каф. строительства и эксплуатации транспортных сооружений, Институт архитектуры и строительства Волгоградского государственного технического университета (ИАиС ВолГГТУ), 400074, Волгоград. E-mail: Balakin-its@yandex.ru

Участие авторов: Балакин В.В. — концепция и дизайн исследования, сбор и обработка материала, статистическая обработка, написание текста; Алексиков С.В. — концепция и дизайн исследования, редактирование; Азаров В.Н. — редактирование. *Все соавторы* — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Поступила: 21.03.2023 / Принята к печати: 07.06.2023 / Опубликовано: 30.08.2023

Vladimir V. Balakin, Sergei V. Aleksikov, Valeri N. Azarov

Ensuring the quality of atmospheric air on main streets and in residential buildings by means of planning and landscaping

Institute of Architecture and Building, Volgograd State Technical University, Volgograd, 400074, Russian Federation

Introduction. The level of concentration of toxic substances in the atmospheric air of main streets is largely determined by their aeration regime, established due to exposure to air flow of buildings and green spaces. Therefore, when developing master plans of cities and projects of detailed planning of residential formations to ensure hygienic standards for the expected content of emissions of motor transport in the air of transport communications and adjacent residential buildings, the influence of urban factors on wind speed and direction one should take into account.

The aim of the study is the justification and selection of urban planning measures to reduce atmospheric air pollution from main roads and streets by exhaust gases of motor transport.

Material and methods. Full-scale surveys of transport infrastructure facilities in large cities and modelling of the processes of dispersion of exhaust gases of cars in the air using models of residential buildings and green spaces.

Results. The regularities of the formation of the aeration regime of city streets and the dispersion of car emissions behind the landscaping strips and in residential buildings have been established. Optimal variants of planning, development and landscaping of main streets have been determined, ensuring the reduction of gas contamination of pedestrian zones, public spaces and residential areas.

Limitations. The choice of landscaping objects for urban roads and streets for field observations and modelling of car emissions dispersion processes is limited to strips of green spaces of a blown and dense construction, without taking into account the peculiarities of the transformation of the air flow and reducing gas pollution under the influence of landscaping strips of an openwork design.

Conclusions. Reduction of gas pollution of main roads and streets is ensured by choosing the direction of the route and planning, and building techniques. At the same time, it is necessary to use environmental protection linear-strip landscaping facilities of optimal design. At the same time, it should be borne in mind that frontal multi-sectional buildings and strips of green spaces of windproof dense construction stimulate the appearance of stable vortices with a closed circulation of impurities in street canyons and on sections of highways. When choosing urban planning solutions to ensure the quality of atmospheric air of transport communications and adjacent residential buildings in various landscape and climatic conditions, it is necessary to take into account the specifics of the tasks arising in this case to regulate the aeration regime and reclamation of the microclimate as a whole.

Keywords: city street; car emissions; residential area; wind speed; aeration regime; green spaces; atmospheric air quality

Compliance with ethical standards. The study does not require the submission of the conclusion of the Biomedical ethics committee or other documents.

For citation: Balakin V.V., Aleksikov S.V., Azarov V.N. Ensuring the quality of atmospheric air on main streets and in residential buildings by means of planning and landscaping. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2023; 102(7): 639–647. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-7-639-647> <https://elibrary.ru/xvdito>

For correspondence: Vladimir V. Balakin, MD, PhD, Associate prof. of the Department of construction and operation of transport works, Institute of Building and Civil Engineering of the Volgograd State Technical University, Volgograd, 400074, Russian Federation. E-mail: Balakin-its@yandex.ru

Contribution: Balakin V.V. – the concept and design of the study, collection and processing of material, statistical processing, writing a text; Aleksikov S.V. – the concept and design of the study, editing; Azarov V.N. – editing. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement. The study had no sponsorship.

Received: March 21, 2023 / Accepted: June 7, 2023 / Published: August 30, 2023

Введение

Результаты эколого-гигиенических исследований показывают, что нормативы содержания отработавших газов (ОГ) автомобильного транспорта в воздухе жилых зон поселений обеспечиваются в определённых климатических областях оптимальным ветровым режимом транспортных коммуникаций, достигаемым путём выбора направления трассы и приёмов планировки, застройки и озеленения [1–3]. Воздействие застройки и зелёных насаждений на аэрационный режим и концентрацию ОГ автомобилей в воздухе магистральных улиц проявляется через изменение скорости и направления ветра, а также ограничение площади поверхности, через которую происходит удаление поллютантов из уличного пространства.

Цель работы – изучение закономерностей трансформации ветра по скорости и формирования концентрации выбросов автомобильного транспорта при изменении плотности застройки и конструкции линейно-полосных структур зелёных насаждений на магистральных дорогах и улицах.

В ходе натурных наблюдений в крупных городах гигиенические нормативы максимальных разовых концентраций (ПДК) оксида углерода CO (≤ 5 мг/м³) и диоксида азота NO₂ ($\leq 0,2$ мг/м³)¹ отмечались преимущественно на участках магистральных улиц с торцовой (строчной) и свободной застройкой при скоростях ветра более 3–4 м/с [4, 5]. Протяжённость таких участков в городах составляет 40–70% всей длины дорог и улиц. На других участках магистральной улично-дорожной сети (УДС), где преобладает плотная фронтальная застройка, при равных параметрах движения содержание CO и NO₂ в атмосферном воздухе оказывалось выше ПДК. Поэтому можно утверждать, что на застраиваемых участках магистральных улиц соответствие ожидаемых концентраций ОГ автомобильного транспорта в воздухе гигиеническим нормативам может быть достигнуто путём регулирования аэрационного режима уличного пространства градостроительными средствами.

В то же время в действующих нормативных документах гигиенические требования к планировке, застройке и озеленению транспортных коммуникаций отражены лишь по отдельным факторам окружающей среды, что сужает диапазон действия градостроительных решений по формированию её качества и одновременно может привести к трудно поправимым ошибкам в проектах. Например, применение экранов (СП 51.13330, п. 12.2, п. 12.9)² или полос озеленения из

крупномерных деревьев в виде вертикальных стен по обеим сторонам дорог и улиц, несомненно, приведёт к снижению уровня транспортного шума в дворовых пространствах, что позволит сократить расстояние между краем основной проезжей части и линией застройки до 25 м (СП 42.13330, п. 11.11)³. Однако это приведёт к появлению устойчивой обратной циркуляции воздушного потока и аккумуляции примесей над проезжей частью транспортных сооружений из-за близкого расположения экранов и первых рядов деревьев [6], а также к сдерживанию их рассеяния в пешеходных зонах, общественных пространствах и у внешних фасадов зданий вследствие ослабления скорости ветра [2]. Из-за препятствий в виде густосомкнутых крон деревьев и плотной фронтальной застройки солнечные лучи не доходят до земной поверхности, и воздух у проезжей части прогревается в меньшей степени, чем в вышележащем слое. При сильном прогреве крыш зданий и плотных вершин деревьев над улицей образуется тёплый инверсионный слой воздуха, препятствующий вертикальному перемешиванию воздушных масс и рассеянию примесей в атмосфере [7]. Поэтому в нормативно-методических документах и в градостроительном проектировании необходим комплексный подход к учёту экологических, метеорологических и микроклиматических факторов при выборе оптимальных приёмов планировки, застройки и озеленения территорий в процессе их освоения под жилую застройку.

В отличие от других метеорологических факторов, оказывающих влияние на формирование концентрации выбросов автомобилей в атмосферном воздухе (относительная влажность воздуха, температурный градиент, уровень солнечной радиации и др.), скорость ветра поддается регулированию градостроительными средствами на разных стадиях проектирования [3]. На стадии генерального плана при определении местоположения фокусов тяготения транспорта и выборе положения трассы транспортных коммуникаций в поселениях учитывается повторяемость ветров по направлениям и скорости с выделением специфических особенностей по сезонам года, проявляемых на осваиваемой территории, вместе с её общеклиматической характеристикой, рельефом, лесорастительными условиями [5, 8]. В процессе разработки проектов детальной планировки и озеленения жилых образований реализуются возможности регулирования аэрационного режима на магистральных улицах различных категорий и в жилой застройке. При этом путём выбора ширины улиц, этажности, протяжённости и расстояния между зданиями, конструкции полос зелёных насаждений вместе с повышением комфортности режима аэрации тер-

¹ СанПиН 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания (утв. Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 28.01.2021 г.).

² СП 51.13330.2011 (31.05.2022 г.) Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23–03–2003.

³ СП 42.13330.2016. Свод правил. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01–89*.

ритории и микроклимата в целом достигается соответствие гигиеническим нормативам концентраций ингредиентов, поступающих в уличное пространство с выбросами автомобильного транспорта.

В связи с этим актуальной задачей градостроительного проектирования в климатических районах с преобладанием низких скоростей ветра (≤ 5 м/с) и штилевой погоды является устранение дефицита скорости ветра для достижения гигиенических нормативов содержания выбросов автомобильного транспорта в атмосферном воздухе. При этом существенное значение имеют локально обусловленные воздушные течения – местные ветры (бризы, горно-долинные ветры и др.), характеризующиеся различными особенностями топографии и разной периодичностью направления и скорости [3]. В таких условиях путём последовательной корректировки проектных решений вместе с достижением оптимального аэрационного режима по теплоощущениям человека необходимо обеспечить приращение скорости ветра Δu для доведения содержания ингредиентов в воздухе до ПДК [1]:

$$\Delta u = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{q_i}{\text{ПДК}_i}, \quad (1)$$

где $\Delta u = u_{\text{пдк}_i} - u$, здесь $u_{\text{пдк}_i}$ – скорость ветра у края проезжей части, обеспечивающая разбавление i -го ингредиента в атмосферном воздухе до санитарной нормы; u – средневзвешенная по длине улицы скорость ветра при альтернативном варианте планировки, подлежащем корректировке, м/с; q_i и $q_i / \text{ПДК}_i$ – ожидаемая концентрации i -го ингредиента в воздухе в мг/м³ и единицах ПДК; α – числовой коэффициент, учитывающий условия формирования концентраций ингредиентов (СО, NO₂ и др.) на магистральных улицах различных категорий.

Согласно (1), при повышении скорости ветра Δu средствами планировки и застройки в пределах комфортных и допустимых скоростей ветра по теплоощущениям человека до 5 м/с [3] снижение концентрации СО на магистральных улицах общегородского ($\alpha = 0,453$) и районного ($\alpha = 0,437$) значения достигают 6 и 8 ПДК соответственно.

Максимальное сохранение скорости ветра и эффективное рассеяние выбросов автомобилей на улицах обеспечивается при расположении зданий с отступом от красной линии, короткими торцами к ветру преобладающего направления, их смещении в рядах и изменении конфигурации в плане [3]. Следует иметь в виду, что при фронтальной застройке улиц многосекционными зданиями с разрывами, заполненными древесно-кустарниковыми группами, примеси удерживаются на наветренной стороне зданий упругим рециркуляционным вихревым потоком высокого давления. В этом случае содержание СО у нижних этажей девятиэтажной застройки, отстоящей от проезжей части на расстоянии 1,5 высоты здания, достигает 150% от первоначального уровня [4].

Полосы озеленения, так же как и здания, существенно изменяют скорость ветра, траекторию движения и концентрацию ингредиентов в воздухе городских улиц [2]. В отличие от элементов застройки зелёные насаждения представляют собой частично проницаемые препятствия, обеспечивающие прямое прохождение части ОГ с воздушным потоком. Другая часть выбросов автомобилей отклоняется зелёной полосой в верхний слой атмосферы, где рассеяние примесей происходит более эффективно, чем при их наземном распространении. Здесь важно учитывать конструкционные параметры полос зелёных насаждений, определяющие их аэродинамические свойства и способность рассеивать примеси в атмосфере, – высоту, плотность, форму кроны и число рядов деревьев, величину междурядий, наличие кустарников [9, 10]. Что касается поглотительной способности деревьев и кустарников, то при практически непрерывном прохождении через них газов, выбрасываемых транспортным потоком, она оказывается не столь существенной среди факторов, определяющих газозащитную эффективность объектов

озеленения на магистральных дорогах и улицах. Причём поглощение газов древесно-кустарниковыми растениями происходит до определённого предела, а затем снижается или прекращается [11].

Таким образом, в состав *задач исследования* входят:

- изучение влияния приёмов планировки и плотности застройки транспортные коммуникации на трансформацию воздушного потока и формирование концентраций выбросов автомобильного транспорта;
- оценка влияния конструктивных особенностей объектов озеленения, формируемых на разделительных полосах магистральных улиц, на аэрационный режим и качество атмосферного воздуха в жилой застройке.

Материалы и методы

Исследования проведены в натуральных условиях и методом моделирования на экспериментальном полигоне. Натурные наблюдения выполнены в трёх крупных городах, относящихся к III климатической зоне [12]. Среднегодовые скорости ветра находятся в пределах 3–5 м/с, повторяемость скоростей ветра 0–1 м/с составляет 20–40% в годовом разрезе. Доля автомобильного транспорта в общем балансе валовых выбросов вредных веществ в городах достигает 85–95%.

Натурными наблюдениями охвачены все периоды года. В течение 6 экспедиционных выездов обследовано более 300 участков магистральных улиц различных категорий, где сделан анализ свыше 6000 проб воздуха на содержание СО и оксидов азота (NO + NO₂). Объекты исследования различались по приёмам планировки и этажности прилегающей застройки, ширине, конструкции и дендрологическому составу зелёных насаждений.

Необходимое число отбираемых проб воздуха n_1 и повторных измерений микроклиматических факторов в каждой исследуемой точке установлены в результате статистической обработки пробных замеров, выполненных на четырёх магистральных улицах, по формуле:

$$n_1 = n \left(\frac{p}{p_1} \right)^2, \quad (2)$$

где n и p – число пробных замеров и их точность, %; p_1 – желаемая точность опыта (5%).

В результате получены следующие значения n_1 : для концентраций СО и NO + NO₂ соответственно 16 и 4, для скорости ветра – 7, для температуры воздуха – 1. Пробы воздуха отбирали в утренние, послеполуденные и вечерние часы (8–10 и 14–18 ч), соответствующие часам пик движения транспорта, на высоте 1,5–2 м у края проезжей части улиц перед первым рядом посадок зелёных насаждений, в глубине полос озеленения и в разрывах между зелёной зоной и линией застройки. Параллельно с отбором проб проводили регистрацию скорости ветра, температурного градиента, влажности воздуха, а также учитывали интенсивность, скорость и состав транспортных потоков по маркам автомобилей. Направление ветра, соответствовавшее периоду отбора проб, изменялось в пределах 45–90° к оси улицы.

Влияние плотности застройки городских улиц на аэрационный режим и качество атмосферного воздуха изучено на открытой ровной площадке с использованием моделей жилых секций зданий длиной 15 м, изготовленных в масштабе 1 : 20 из тонкой древесно-волоконистой плиты. При таком изменении линейных размеров геометрических тел в виде пластин обеспечивается соблюдение критериев подобия в процессе моделирования обтекания зданий воздушным потоком [13]. Плотность застройки вдоль красных линий варьировалась на участке улицы протяжённостью 300 м путём изменения длины зданий и величины разрывов между ними. Для наблюдений за метеорологическими факторами вблизи полигона была оборудована площадка с флюгером, чашечными анемометрами МС-13, аспирационным психрометром

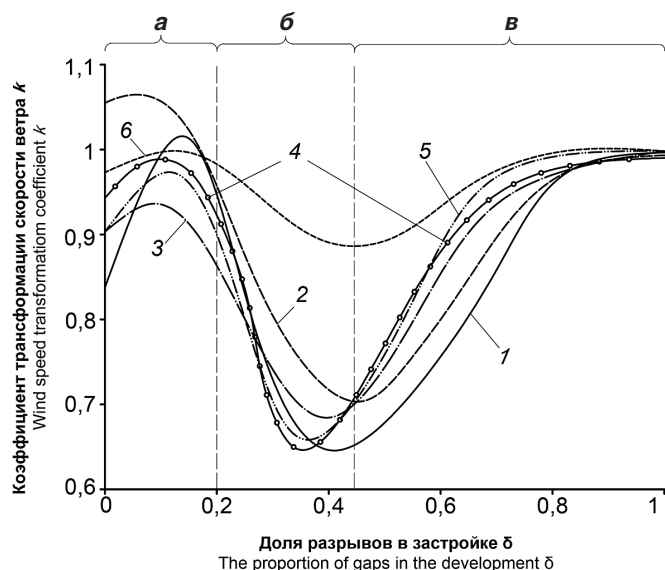


Рис. 1. Изменение коэффициента трансформации ветра по скорости k у проезжей части от доли разрывов δ в застройке при ширине улицы B : 1 – H ; 2 – $2H$; 3 – $3H$; 4 – $4H$; 5 – $6H$; 6 – $10H$; H – высота здания, м. Режимы трансформации воздушного потока: a – сохранение и усиление скорости ветра; b – снижение скорости ветра; v – восстановление скорости ветра.

Fig. 1. Change in the wind transformation coefficient by speed k at the carriageway from the share of breaks δ in the building with a street width B : 1 – H ; 2 – $2H$; 3 – $3H$; 4 – $4H$; 5 – $6H$; 6 – $10H$; H – the height of the building, m.

Modes of air flow transformation: a – preservation and strengthening of wind speed; b – reduction of wind speed; v – restoration of wind speed.

МВ-4М и анеморумбометром М63М-1, закреплёнными на мачте. Угол между направлением воздушного потока и продольной осью улицы во время эксперимента был близок к 90° .

Воздействие застройки на трансформацию скорости ветра оценивали по показателю δ , характеризующему долю разрывов между зданиями вдоль красных линий или степень продуваемости улицы ветром:

$$\delta = 1 - \rho, \tag{3}$$

где ρ – плотность застройки (отношение общей длины зданий на участке улицы к протяжённости его периметра по линиям застройки).

Коэффициенты трансформации ветра по скорости k на улицах
Coefficients of wind transformation in terms of speed k on the streets

Тип застройки Type of building	Параметр застройки Building parameters			Значения k в зависимости от ширины улицы по линиям застройки, м k values depending on the width of the street along the building lines, m						
	l	l_p	δ	15	30	45	60	90	120	150
Точечная / Point	15	30	0.64	0.80	0.84	0.89	0.95	0.92	0.95	0.99
Точечная / Point	15	15	0.47	0.65	0.71	0.70	0.68	0.74	0.89	0.98
Двухсекционная / 2-sectional	30	30	0.46	0.80	0.86	0.85	0.84	0.86	0.94	0.99
Двухсекционная / 2-sectional	30	15	0.30	0.77	0.84	0.82	0.73	0.71	0.87	0.96
Трёхсекционная / 3-sectional	45	15	0.21	0.85	0.94	0.84	0.94	1.00	0.99	1.00
Четырёхсекционная / 4-sectional	60	15	0.16	1.02	1.02	0.95	0.98	0.93	0.98	1.00
Многосекционная (каньон) Multi-section (canyon)	300	0	0	0.82	1.04	0.91	0.91	0.95	0.95	0.97

Примечание. l – длина зданий, м; l_p – величина разрыва между зданиями, м.

Note: l is the length of buildings, m; l_p is the size of the gap between buildings, m.

По показаниям анемометров с воспринимающей частью на высоте 10 см от поверхности площадки, установленных вдоль оси улицы, рассчитывали средневзвешенную скорость ветра над проезжей частью по формуле:

$$u = \frac{\sum_{j=1}^n u_j \cdot l_j}{L}, \tag{4}$$

где u_j – скорость ветра в пунктах наблюдений, м/с; l_j – длина здания (величина разрыва между зданиями), м; L – протяжённость участка улицы, м; n – число измерений.

Коэффициент трансформации ветра по скорости под воздействием застройки устанавливали по формуле:

$$k = \frac{u}{u_0}, \tag{5}$$

где u_0 – исходная скорость ветра на метеорологической площадке на высоте 10 см, м/с.

При изучении процессов рассеяния ОГ полосами зелёных насаждений продуваемой и плотной конструкции использовали их модели в масштабе 1 : 20, изготовленные в соответствии с характеристикой данных объектов озеленения, приведённой в работах Ф.Л. Серебровского [14] и Я.А. Смалько [9], в виде объёмных проволочных каркасов, заполненных до заданной плотности синтетическим волокном. В качестве источника ОГ использовали карбюраторный двигатель, соединённый с трубопроводом, проложенным вдоль оси улицы. Выброс газов осуществлялся по обоим сторонам трубы в продольном направлении через патрубки, имитирующие транспортный поток.

Отбор проб воздуха производили в достаточно густой сетке точек на вертикальной плоскости, перпендикулярной оси улицы, у полос озеленения, внешнего и дворового фасадов зданий, а также в пределах защищаемой прилегающей территории. Газовоздушную смесь протягивали аспирационными установками через сосуды с поглотительной жидкостью по воздухозаборным полихлорвиниловым трубкам, закреплённым у пунктов отбора проб на металлических стойках облегчённой конструкции, равномерно рассредоточенных по поперечному сечению улицы. Во время эксперимента отобрано и обработано 2300 проб воздуха.

Результаты

Коэффициенты трансформации скорости ветра под воздействием застройки городских улиц приведены в таблице, а также представлены в виде корреляционных графиков на рис. 1.

По результатам анализа проб воздуха методом интерполяции построены изолинии концентраций $NO + NO_2$ на вер-

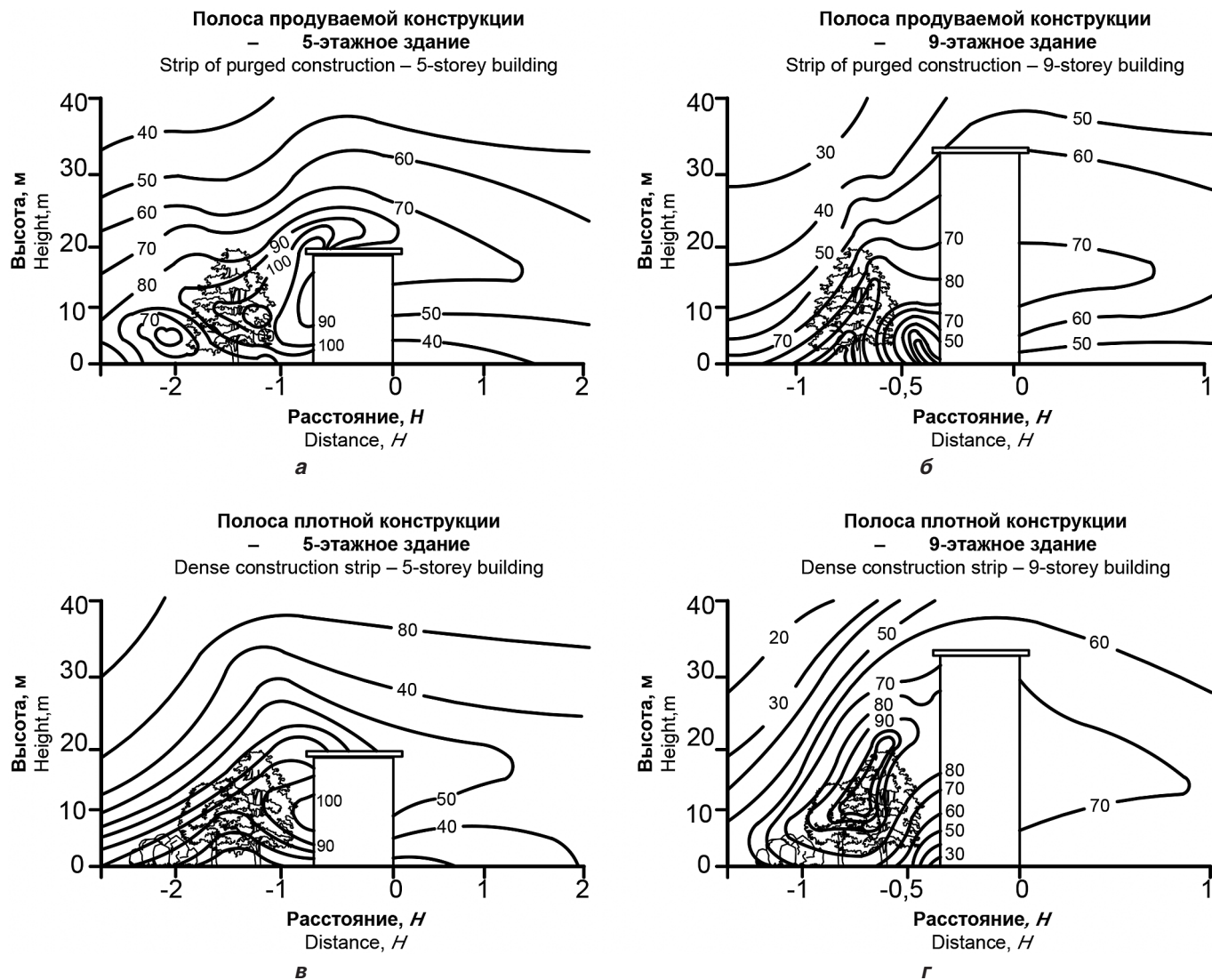


Рис. 2. Распространение выбросов автомобилей в системе «проезжая часть – зелёная полоса – здание». Изолинии – концентрации $\text{NO} + \text{NO}_2$, % от уровня, фиксируемого перед полосой озеленения. H – высота здания, м.

Fig. 2. Distribution of car emissions in the «roadway – green lane – building» system. Isolines – concentrations of $\text{NO} + \text{NO}_2$, % of the level recorded before the landscaping strip. H – the height of the building, m.

тикальной плоскости в пределах поперечного сечения архитектурно-планировочной системы «проезжая часть – зелёная полоса – здание» при различных приёмах озеленения улиц и этажности зданий (рис. 2). Поскольку при полном смешении с атмосферным воздухом отдельные компоненты ОГ быстро теряют свою динамическую индивидуальность [1], можно считать, что полученные закономерности рассеяния $\text{NO} + \text{NO}_2$ в воздухе городских улиц являются репрезентативными в отношении всех газов, выбрасываемых потоками автомобильного транспорта на транспортных сетях городов.

Обсуждение

Из данных таблицы следует, что на улицах шириной до 60 м снижение скорости ветра при точечной застройке с разрывами до 15 м на 10–20% выше, чем при застройке улиц двухсекционными и трёхсекционными зданиями. Наиболее выражено падение скорости воздушного потока при значении параметра δ в диапазоне от 0,25 до 0,4 (кривые 1–5 на рис. 1). При изменении доли разрывов δ между зданиями по линиям застройки от 0 до 1 скорость ветра на улице находится в пределах 65–108% от исходной скорости ветра попереч-

ного направления. Характер хода кривых на рис. 1 отражает также колебания относительной скорости воздушного потока k над проезжей частью улиц разной ширины. Здесь выделяются три режима трансформации ветра по скорости:

- сохранение и усиление скорости ветра в уличном каньоне ($0,9 \leq k \leq 1,1$; $0 \leq \delta \leq 0,2$);
- снижение скорости ветра до минимума при разуплотнении застройки улицы ($0,65 \leq k < 0,9$; $0,2 < \delta \leq 0,45$);
- восстановление исходной скорости ветра при переходе к открытому пространству ($0,65 < k \leq 1$; $0,45 < \delta \leq 1$).

В режиме трансформации *a* часть набегающего воздушного потока после встречи с фронтально расположенным с наветренной стороны многосекционным зданием ($l \geq 30$ м) огибает его сверху и заходит по круговой траектории внутрь уличного каньона. Затем, достигнув фасада противоположного здания, направляется вниз к земной поверхности, возвращается к наветренному зданию и поднимается к его верхним этажам, замещая воздушную массу, захваченную другой частью потока, проходящей над улицей по обычной траектории. В данном случае обратная циркуляция воздушного потока в уличном каньоне стимулируется плотной фронтальной застройкой. Признаки такого движения появляются на

улицами шириной $B = (1-2) \cdot H$ (высота зданий) при точечной ($l \leq 15$ м) и двухсекционной застройке ($l = 30$ м) с разрывами между зданиями менее 15 м [1]. При многосекционной ($l \geq 45$ м) и сплошной ($l = L$) фронтальной застройке наблюдается повышение скорости вихревого потока (кривые 1 и 2 на рис. 1, строки 5–7 в таблице). Это хорошо согласуется с подобными экспериментами, когда из-за устойчивого вихря значительные скорости ветра в уличных каньонах были зафиксированы у стен зданий при расстоянии между ними $B = (2-3) \cdot H$ [15–17].

По натурным наблюдениям на улицах с плотной фронтальной застройкой отмечается повышенная загазованность, а усиление скорости ветра поперечного направления не приводит к снижению концентрации СО в воздухе [18]. Как показывают результаты ряда исследований, это связано с замкнутой циркуляцией примесей в уличных каньонах при вихревом движении воздушного потока [15–17, 19]. При этом наиболее высокими оказываются концентрации ОГ у первого – третьего этажей наветренного ряда зданий вследствие снижения скорости воздушного потока у наветренных фасадов подветренных зданий при преодолении конвективного противотока и микрошероховатостей в виде выступающих элементов – балконов, эркеров, козырьков, а также вертикального озеленения, древесно-кустарниковых насаждений, малых архитектурных форм, откосов, подпорных стен. При этом большая часть ингредиентов после переноса с проезжей части большим вихрем удерживается у нижних этажей со стороны подветренных стен наветренных зданий локальным вихрем малого размера с противоположным направлением вращения [16]. У населения, проживающего на первом – третьем этажах зданий с наветренной по отношению к господствующему направлению ветра стороны улиц с плотной застройкой установлены более высокие показатели заболеваемости, чем у жителей верхних этажей [20].

Уличные каньоны чувствительны к отклонениям направления ветра от перпендикуляра к оси улицы. В этом случае многосекционная двусторонняя застройка стимулирует движение воздушного потока вдоль улицы по винтообразной траектории [13, 14]. При этом замкнутая циркуляция воздушной массы охватывает достаточно протяжённые участки УДС, особенно в центральных планировочных районах городов, где размещение учреждений торгового, культурно-бытового и административного назначения в разрывах застройки главных магистралей приводит к её переуплотнению и повышению загазованности уличного пространства.

Эффективность рассеяния ОГ в каньонах городских улиц существенно зависит от отношения высоты зданий H к ширине улицы B по линиям застройки [21]. Согласно натурным наблюдениям, коэффициент корреляции между концентрацией СО и данным геометрическим параметром находится в пределах 0,6–0,7. При $H/B \leq 1$ уровень загрязнения воздуха магистральных улиц более чем в два раза выше, чем на незастроенных участках магистральных дорог при равной интенсивности движения [12]. При нелинейном характере такой зависимости наиболее неблагоприятные условия для рассеяния выбросов автотранспорта складываются при отношении высоты застройки к ширине улиц более 0,3. Поэтому исходя из необходимости обеспечения высокого качества атмосферного воздуха на магистральных улицах районного и общегородского значения величину параметра H/B следует принимать не более 0,25–0,3, что соответствует минимальной ширине улиц данных категорий по линиям застройки, равной соответственно трём и четырём высотам зданий. В таких условиях трансформация воздушного потока происходит по схемам турбулентно-струйного обтекания, а затем, с увеличением ширины улиц, – изолированного обтекания параллельно стоящих зданий, когда исключается вероятность появления замкнутой циркуляции примесей в уличном пространстве [1].

В условиях переуплотнённой застройки уличных каньонов при режиме трансформации ветра по скорости a необходимый воздухообмен и качество атмосферного воздуха в

зонах пешеходного движения и на территории общественных пространств, организуемых в границах городских улиц, обеспечиваются формированием в пределах боковых разделительных полос линейно-полосных структур зелёных насаждений продуваемой конструкции (см. рис. 2, а, б).

По мере разуплотнения застройки в режиме трансформации ветра b происходит интенсивное снижение скорости ветра у проезжей части улиц разной ширины из-за постепенного увеличения количества хаотичных по направлению, в том числе и встречных, вихрей малого размера по углам зданий. Парные горизонтальные вихри встречного вращения, появляющиеся у торцов зданий точечного типа [21], имеют более осязательное воздействие на основной воздушный поток, чем вертикальные вихри, возникающие при обтекании им зданий сверху.

В диапазоне значений показателя δ от 0,2 до 0,45, соответствующем режиму трансформации ветра b , возможно использование различных приёмов планировки, застройки и озеленения городских улиц и жилых образований в зависимости от характера задач регулирования их аэрационного режима и мелиорации микроклимата в целом, возникающих в различных ландшафтно-климатических условиях местности. В климатических областях со средними скоростями ветра 5–10 м/с и сильными ветрами со скоростью более 10 м/с (степи, лесостепи, полупустыни, лесотундра) [8] первоочередной задачей при выборе градостроительных решений по мелиорации микроклимата является защита жилых территорий, детских образовательных организаций, лечебно-оздоровительных учреждений от холодных ветров, горячих суховея и пыльных бурь, что достигается использованием ветрозащитных свойств рельефа, городской застройки, зелёных массивов и других объектов озеленения. Наиболее эффективными здесь оказываются замкнутые жилые группы, а также плотная фронтальная застройка магистральных улиц с наветренной (по отношению к преобладающим направлениям ветра) стороны в сочетании с многорядными полосами озеленения, состоящими из деревьев с широкой кроной и кустарников. При таких приёмах планировки, разной высоте зданий и полос озеленения коэффициент трансформации скорости ветра колеблется в пределах 0,05–0,5 [3]. В географических районах с преобладанием низких скоростей ветра (до 3 м/с) и штилей (0–1 м/с) – лесной и таёжной ландшафтных подзонах, широколиственных лесах, влажных субтропиках и др. [8] в тёплое время года у жителей поселений появляются дискомфортные теплоощущения при повышенном уровне загрязнения атмосферного воздуха. В данных климатических областях первоочередной задачей проектировщика является выбор планировочных решений транспортных коммуникаций, максимально сохраняющих аэрационный потенциал и стимулирующих их эффективное проветривание.

Для определения аэрационного ресурса Δu в формуле 1, требуемого для достижения гигиенических нормативов содержания отдельных компонентов ОГ в воздухе средствами планировки, необходимо, используя общепринятые методики расчёта, дать прогнозную оценку начального уровня загрязнения воздуха q_i на рассматриваемых участках магистральных улиц и вычислить правую часть уравнения. Затем из соотношения $\Delta u = u_{\text{ПДК}_i} - u$ при известном значении Δu и скорости ветра u по альтернативному варианту планировки улицы, подлежащему корректировке, определяется $u_{\text{ПДК}_i}$. После этого с использованием розы ветров по скорости из соотношения $u_{\text{ПДК}_i} = u_0 \cdot k_i$ устанавливается коэффициент трансформации скорости ветра k_i , обеспечивающий ПДК изучаемого компонента ОГ:

$$k_i = \frac{u_{\text{ПДК}_i}}{u_0}, \quad (6)$$

где u_0 – средняя скорость ветра в рассматриваемой климатической зоне для перпендикулярного к оси улицы направления, м/с.

После этого по кривым на рис. 1 определяется соответствующая вычисленному значению k , плотность застройки, необходимая для доведения концентрации учитываемого в формуле 1 ингредиента до гигиенического норматива. При прогнозировании уровня загрязнения атмосферного воздуха на магистральных дорогах и улицах можно использовать многофакторную модель для расчёта начальной концентрации CO , полученную по результатам натуральных наблюдений [4].

В целях сохранения исходных скоростей ветра возможно формирование жилых групп, открытых к благоприятным румбам, с расположением зданий на наветренной стороне улиц под острым углом (не более 45°) к преобладающему направлению ветра, а также использование приёмов свободной планировки с включением в развёртку магистральных улиц легко обтекаемых зданий башенного типа. Коэффициент трансформации ветра по скорости для таких типов застройки находится в пределах 0,6–0,95 [3].

В режиме трансформации скорости ветра v при дальнейшем разуплотнении уличной застройки происходит ослабление тормозящего воздействия на воздушный поток боковых вихрей у углов зданий. Это наиболее выражено в диапазоне значений $\delta = 0,45–0,7$ ($k = 0,65–0,9$) при использовании точечной застройки с разрывами более $2H$. А при значениях $\delta = 0,7–1$, согласно данным таблицы, снижение скорости ветра уже не столь существенно ($k = 0,9–1$). При этом наблюдающийся воздушный поток восстанавливает траекторию и сохраняет исходную скорость на соответствующих участках УДС, замкнутые вертикальные вихри над проезжей частью разрушаются, и связанная с ними опасность повышенного загрязнения атмосферного воздуха ликвидируется. По расположению кривой 6 на рис. 1 видно, что при ширине улиц $B \geq 10H$ влияние застройки на трансформацию ветра по скорости постепенно нивелируется. Это согласуется с результатами исследования проветривания промышленных площадок, согласно которым предельная длина зоны циркуляции воздушного потока между ближайшими параллельными зданиями не превышает десяти их высот [22]. При большем расстоянии между зданиями происходит разрыв единой циркуляционной зоны, после чего наблюдается раздельное обтекание воздушным потоком отдельно стоящих зданий.

Полосы озеленения существенно деформируют воздушные потоки по скорости и направлению и поля концентрации ингредиентов в зонах их влияния – на открытом пространстве, в пределах транспортных коммуникаций и на территории жилой застройки. Снижение концентрации (%) компонентов ОГ автомобилей полосой зелёных насаждений при обособленном расположении или в сочетании с торцовой и свободной застройкой улицы может быть установлено по эмпирической формуле [23]:

$$\omega = 48 \cdot (1 + 0,016h) \cdot K^{\frac{2}{3}}, \quad (7)$$

где h – высота полосы, м; K – коэффициент ажурности – отношение площади листвы и ветвей растений к общей площади, занимаемой зелёной полосой на фронтальной проекции.

При изучении закономерностей трансформации воздушного потока и рассеяния выбросов автомобилей зелёными насаждениями выбор объектов исследования был ограничен полосами продуваемой и плотной конструкции. При этом экранирующие свойства полос озеленения ажурной конструкции не учитывались. Это ограничение связано с необходимостью учёта в общих рекомендациях по оздоровлению жилой среды наиболее характерных особенностей трансформации ветра полосами зелёных насаждений и проявления их газозащитных свойств, имеющих первостепенное значение с точки зрения обеспечения высокого качества атмосферного воздуха. При встрече с полосой продуваемой конструкции часть воздушного потока огибает её сверху, а другая его достаточно значительная часть проходит беспрепятственно через сквозной просвет высотой 1–2 м под кронами деревьев. При преодолении же воздушным потоком полос плотной

сверху донизу конструкции с числом сквозных просветов не более 5% (согласно [13]) он практически полностью поднимается вверх и переваливает через полосу. Поскольку у таких посадок растений практически равно нулю просачивание ветрового потока, его скорость за полосой снижается до штиля. У полос ажурной конструкции со сквозными просветами, равномерно распределёнными по высоте, часть воздушного потока просачивается через открытые участки. В остальном процесс трансформации воздушного потока у плотных и ажурных полос аналогичен. Исходя из этого при выборе объектов озеленения городских улиц для исследования принято, что полосы плотной и ажурной конструкции весьма близки по ветро- и газозащитным свойствам. Поэтому для выявления характера трансформации воздушного потока и рассеяния выбросов автомобилей в системе «зелёная полоса – фронтальная застройка» с принципиально различными приёмами озеленения улиц достаточно было провести наблюдения в натуральных условиях и испытания моделей полос озеленения плотной и продуваемой конструкций.

На незастроенных участках городских дорог наиболее оптимальной по газозащитным свойствам является полоса зелёных насаждений плотной конструкции шириной 15–30 м при значении K в нижнем ярусе 0,7–1 и постепенном уменьшении плотности фитомассы к вершине. Газозащитный эффект полосы плотной непродуваемой конструкции по отношению к зоне пешеходного движения на 30% выше, чем у продуваемой полосы, благодаря более выраженной изолирующей способности. Поэтому со стороны проезжей части следует формировать двухъярусные живые изгороди из кустарников, а затем ряды деревьев с низкими штамбом и плотно сомкнутыми кронами. При этом следует иметь в виду, что наименьший уровень загрязнения воздуха наблюдается сразу же за полосой, а наиболее высокие концентрации компонентов ОГ отмечаются в зоне касания земной поверхности переваливающей через полосу частью потока на расстоянии трёх – четырёх высот деревьев. Поэтому для расширения площади территории, защищаемой от выбросов автомобилей, следует включать в породный состав посадок ряды из высокорастущих деревьев (тополя белый, чёрный, канадский, клёны, вязы и др.). Вместе с тем в пределах полос озеленения плотной конструкции концентрации ОГ остаются высокими из-за малой скорости ветра [2, 4]. Это необходимо учитывать при выборе схемы пешеходных путей и территории вблизи полос озеленения при организации общественных пространств.

Введение в объёмно-планировочную композицию магистральных улиц зелёных насаждений вызывает существенные изменения в трансформации ветра и рассеянии поллютантов в воздухе. В системе «проезжая часть – зелёная полоса – здание» с многосекционной фронтальной застройкой выделяются зоны повышенных концентраций компонентов ОГ на вертикальном профиле: между полосой и зданием, по внешнему фасаду, у верхних этажей дворового фасада и у земной поверхности с подветренной стороны на расстоянии $3H$ (см. рис. 2). Это связано с трансформацией по скорости и направлению воздушного потока, огибающего растения и здания, и образованием зон локальной циркуляции примесей.

Аэрационный режим и эффективность рассеяния компонентов ОГ автомобилей в уличном пространстве определяются конструкцией полос зелёных насаждений и высотой застройки. Газозащитную эффективность полос озеленения по отношению к зоне пешеходного движения и застройке можно рассчитать, используя эмпирическую зависимость [23]:

$$\omega = 57 \left[\frac{11b^{0,22} \left(1 + 2,63K^{\frac{1}{3}} \right) h^{1,65}}{H^{1,87} e^{3,34\frac{b}{H}}} - 1 \right], \quad (8)$$

где b – расстояние между линией застройки и краем проезжей части, м; K – коэффициент ажурности; h – высота

полосы озеленения, m ; H — средняя высота зданий на линии застройки, m ; e — основание натуральных логарифмов.

Как следует из формулы 8, вместе с плотностью полос зелёных насаждений, характеризующей коэффициентом ажурности, наиболее существенным фактором, учитываемым в расчётах снижения уровня загазованности пешеходных зон и общественных пространств, является их относительная высота h/H . По характеру изолиний на рис. 2 видно, что при равной высоте полосы озеленения и зданий между ними формируются достаточно высокие концентрации $NO + NO_2$ (см. рис. 2, а, в). А при уменьшении высоты растений в два раза происходит существенное снижение загазованности за полосой в пределах пешеходной зоны и у внешних фасадов зданий, где стимулируется интенсивный воздухообмен (см. рис. 2, б, г).

При приближении высоты полос зелёных насаждений к высоте зданий наблюдается уменьшение концентрации $NO + NO_2$ в дворовом пространстве, что связано с увеличением траектории движения и более эффективным рассеянием примесей в верхнем слое атмосферы. При достижении полосами зелёных насаждений высоты зданий дополнительное снижение уровня загрязнения воздуха $NO + NO_2$ по их дворовым фасадам составляет 20% для продуваемой конструкции и 50% для плотных непродуваемых полос. Иными словами, с увеличением высоты деревьев в системе «зелёная полоса — фронтальная застройка» их газозащитная роль перераспределяется на внутриквартальное пространство. Однако в пределах плотных полос древесно-кустарниковых растений с крупномерными деревьями из-за снижения скорости ветра происходит накопление примесей, при этом они становятся вторичными источниками загрязнения атмосферного воздуха на городских улицах (см. рис. 2, в). Поэтому такие полосы озеленения следует использовать совместно с фронтально расположенными зданиями нежилого назначения (гаражами, мастерскими, складами, торгово-офисными объектами и др.) на участках дорог и улиц у границ жилых территорий городов, а также на автомобильных дорогах в пригородных зонах с коттеджными посёлками следует использовать плотные полосы озеленения с крупномерными деревьями в качестве непроницаемых экранов-барьеров для эффективной защиты жилых массивов от негативного воздействия транспорта.

Заключение

По результатам натурных наблюдений и экспериментов с использованием моделей зданий и полос зелёных насаждений установлены закономерности трансформации ветра и формирования уровня загрязнения атмосферного воздуха транспортных коммуникаций с различной планировкой и озеленением. Дана оценка влияния периметральной плотности застройки магистральных улиц на изменение скорости ветра над проезжей частью.

Установлено, что загрязнение атмосферного воздуха на участках УДС города с плотной фронтальной застройкой, образующей систему полузамкнутых объёмов в виде каньонов, приобретает очаговый характер вследствие появления замкнутой циркуляции выбросов автомобилей, препятствующей воздухообмену при поперечных господствующих направлениях ветра. В целях снижения повышенной загазованности необходимо ограничивать количество многосекционных зданий на наветренной стороне магистральных улиц по отношению к преобладающему направлению ветра, применять приёмы торцовой и свободной застройки со смещением зданий в ряду, расположением их под острым углом к линии застройки, изменением этажности и конфигурации в плане.

При разуплотнении застройки уличных каньонов происходит снижение скорости ветра за счёт тормозящего воздействия на воздушный поток боковых вихрей у углов зданий до локального минимума, фиксируемого при от-

носительно равном соотношении длины застроенных и открытых участков. Дальнейшее увеличение разрывов в застройке городских улиц приводит к ослаблению влияния боковых вихрей по торцам зданий на снижение скорости ветра, при этом набегающий воздушный поток постепенно восстанавливает исходную скорость в уличном пространстве.

Для снижения загрязнения атмосферного воздуха транспортных коммуникаций и жилых зон в различных климатических областях при выборе градостроительных решений необходимо учитывать повторяемость ветров по скорости и направлению в тёплый и холодный периоды года и специфику задач сезонного характера по мелиорации микроклимата. В целях снижения уровня загрязнения атмосферного воздуха, защиты жилых территорий поселений от сильных ветров или обеспечения их комфортного проветривания с сохранением исходных скоростей ветра возможно широкое использование архитектурно-планировочных средств регулирования аэрационного режима. Пределы изменения скорости ветра устанавливаются в соответствии с гигиеническими требованиями и местными природно-климатическими условиями.

Снижение загрязнения воздуха на автомобильных дорогах и улицах зелёными насаждениями происходит благодаря рассеянию выбросов автомобильного транспорта в верхнем слое атмосферы при обтекании объектов озеленения воздушным потоком. Рассеивающая способность полос зелёных насаждений определяется количеством рядов, высотой, формой крон и плотностью фитомассы деревьев и кустарников. На участках магистральных и скоростных дорог для эффективной защиты жилых массивов с индивидуальной застройкой от загазованности и сильных ветров следует использовать многорядные посадки деревьев с плотными густосомкнутыми кронами и подлески с кустарниками, образующие ступенчатую форму поперечного сечения придорожных полос озеленения.

В сочетании с фронтальной застройкой улиц более эффективными для снижения уровня загрязнения воздуха в зонах пешеходного движения и общественных пространствах являются полосы озеленения продуваемой конструкции при высоте деревьев в составе посадок, равной половине высоты зданий. Поэтому в уличных каньонах необходимо ограничивать высоту деревьев в полосах озеленения у средних этажей зданий для обеспечения достаточного воздухообмена и снижения концентрации выбросов автомобильного транспорта, а также предупреждать развитие древесно-кустарниковой растительности над проезжей частью и тротуарами путём проведения конструктивных рубок, рубок ухода, прочисток и стрижек.

Результаты исследования показали, что гигиенические нормативы содержания выбросов автомобильного транспорта в атмосферном воздухе жилых районов достигаются в различных ландшафтно-климатических условиях местными градостроительными средствами — регулированием ветрового режима транспортных коммуникаций путём выбора направления трассы и приёмов планировки, застройки и озеленения. Поэтому в практике предупредительного санитарного надзора при согласовании и утверждении проектной документации по общей архитектурно-планировочной организации территории, транспортному планированию и детальному проектированию жилых зон поселений необходим учёт мероприятий, обеспечивающих оптимальный аэрационный режим и соблюдение нормативов содержания (ПДК) вредных веществ в атмосферном воздухе. При этом вместе с внедрением в проектную практику новых теоретических и экспериментальных разработок, направленных на охрану атмосферного воздуха от загрязнения выбросами автомобильного транспорта, следует широко использовать имеющийся опыт градостроительного проектирования, обеспечивающий, согласно результатам социально-гигиенического мониторинга, высокое качество жилой среды.

Литература

(п.п. 15–17, 19, 21 см. References)

- Пинигин М.А., Сидоренко В.Ф., Антюфеев А.В., Балакин В.В. Выбор градостроительных решений по снижению загрязнения атмосферного воздуха в жилых районах выбросами автомобильного транспорта. *Гигиена и санитария*. 2021; 100(2): 92–8. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-2-92-98> <https://elibrary.ru/bgemu4>
- Балакин В.В., Сидоренко В.Ф., Слесарев М.Ю., Антюфеев А.В. Формирование средозащитных объектов озеленения в градоэкологических системах. *Вестник МГСУ*. 2019; 14(8): 1004–22. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.8.1004-1022> <https://elibrary.ru/ayeqxb>
- Семашко К.И. *Руководство по оценке и регулированию ветрового режима жилой застройки*. М.: Стройиздат; 1986.
- Балакин В.В. Защита жилой застройки от выбросов автотранспорта. *Жилищное строительство*. 1984; (6): 16–7.
- Балакин В.В. Градостроительные мероприятия по регулированию аэрационного режима и снижению загрязнения атмосферного воздуха транспортных коммуникаций. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2022; (2): 218–32. <https://elibrary.ru/qoyqfl>
- Подольский В.П., Канишев А.Н., Рудаев В.Н. Определение ажурности в снегозадерживающих лесополосах. В кн.: *Решение экологических проблем в автотранспортном комплексе. Сборник докладов V Международной научно-технической конференции*. М.; 2001.
- Балакин В.В. Учет пространственно-временной динамики загрязнения атмосферного воздуха транспортных коммуникаций в градостроительстве. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2020; (4): 340–52. <https://elibrary.ru/wkzilo>
- Лавров В.А., Солофенко Н.А., Смоляр И.М. *Градостроительство (справочник проектировщика)*. М.: Стройиздат; 1978.
- Смалко Я.А. *Ветрозащитные особенности лесных полос разных конструкций*. Киев: Урожай; 1963.
- Городков А.В. *Рекомендации по проектированию средозащитного озеленения территорий городов*. СПб.; 1998.
- Чернышенко О.В. *Поглотительная способность и газоустойчивость древесных растений в условиях города*. М.; 2001. <https://elibrary.ru/yafjxa>
- Балакин В.В. Закономерности формирования концентраций отработавших газов автомобильного транспорта в каньонах городских улиц. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2008; (9): 76–82. <https://elibrary.ru/kzhytt>
- Реттер Э.И. *Архитектурно-строительная аэродинамика*. М.: Стройиздат; 1984.
- Серебровский Ф.Л. *Аэрация населенных мест*. М.: Стройиздат; 1985.
- Балакин В.В. Влияние застройки на формирование аэрационного режима городских дорог и улиц. В кн.: *Дорожная экология XXI века. Труды международного научно-практического симпозиума*. Воронеж; 2000: 101–9. <https://elibrary.ru/rignsm>
- Ванкевич Р.В. *Применение методов системного анализа и ГИС-технологий к построению количественных взаимосвязей в системе «автотранспорт – городская среда – здоровье»*: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. СПб.; 2003.
- Никитин В.С., Максимкина Н.Г., Самсонов В.Т., Плотникова Л.В. *Проветривание промышленных площадок и прилегающих к ним территорий*. М.: Стройиздат; 1980.
- Балакин В.В. Принципы формирования средозащитных полос зеленых насаждений на городских дорогах и улицах. В кн.: *Ученые Волгограда – развитию города. Сборник статей*. Волгоград; 2009: 109–11. <https://elibrary.ru/vylhbp>

References

- Pinigin M.A., Sidorenko V.F., Antyufeev A.V., Balakin V.V. Architectural choices aimed at reducing the air pollution by vehicle emissions in residential areas. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2021; 100(2): 92–8. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-2-92-98> <https://elibrary.ru/bgemu4> (in Russian)
- Balakin V.V., Sidorenko V.F., Slesarev M.Yu., Antyufeev A.V. Formation of environmental protection landscaping facilities in urban ecological systems. *Vestnik MGSU*. 2019; 14(8): 1004–22. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.8.1004-1022> <https://elibrary.ru/ayeqxb> (in Russian)
- Semashko K.I. *Guidelines for the Assessment and Regulation of the Wind Regime of Residential Development [Rukovodstvo po otsenke i regulirovaniyu vetrovogo rezhima zhiloy zastroyki]*. Moscow: Stroyizdat; 1986. (in Russian)
- Balakin V.V. Protecting residential buildings from vehicle emissions. *Zhishchnoe stroitel'stvo*. 1984; (6): 16–7. (in Russian)
- Balakin V.V. Urban planning measures for regulation aeration regime and pollution reduction atmospheric air transport communications. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2022; (2): 218–32. <https://elibrary.ru/qoyqfl> (in Russian)
- Podolskiy V.P., Kanishchev A.N., Rudaev V.N. Determination of tracery in snow-retaining forest belts. In: *Solving Environmental Problems in the Motor Transport Complex. Collection of Reports of the V International Scientific and Technical Conference [Reshenie ekologicheskikh problem v avtotransportnom komplekse. Sbornik dokladov V Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii]*. Moscow; 2001. (in Russian)
- Balakin V.V. Accounting for spatiotemporal dynamics of air pollution at the transport communications in urban planning. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2020; (4): 340–52. <https://elibrary.ru/wkzilo> (in Russian)
- Lavrov V.A., Solofnenko N.A., Smolyar I.M. *Urban Planning (Designer's Guide) [Gradostroitel'stvo (spravochnik projektirovshchika)]*. Moscow: Stroyizdat; 1978. (in Russian)
- Smal'ko Ya.A. *Wind-Sheltering Characteristics of Green Belts of Various Structures [Vetrozashchitnye osobennosti lesnykh polos raznykh konstruktсий]*. Kiev: Urozhay; 1963. (in Russian)
- Gorodkov A.V. *Recommendations for the Design of Environmental Protection Landscaping of Urban Areas [Rekomendatsii po projektirovaniyu sredozashchitnogo ozeleneniya territoriy gorodov]*. St. Petersburg; 1998. (in Russian)
- Chernyshenko O.V. *Absorption Capacity and Gas Resistance of Woody Plants in Urban Conditions [Poglotitel'naya sposobnost' i gazoustoychivost' drevesnykh rasteniy v usloviyakh goroda]*. Moscow; 2001. (in Russian)
- Balakin V.V. Regularities of the formation of automobiles' exhaust gases concentrations in the canyons of city streets. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2008; (9): 76–82. <https://elibrary.ru/kzhytt> (in Russian)
- Retter E.I. *Architectural and Construction Aerodynamics [Arkhitekturno-stroitel'naya aerodinamika]*. Moscow: Stroyizdat; 1984. (in Russian)
- Serebrovskiy F.L. *Aeration of Populated Areas [Aeratsiya naseleennykh mest]*. Moscow: Stroyizdat; 1985. (in Russian)
- Uehara K., Murakami S., Oikawa S., Wakamatsu S. Wind tunnel experiment on how thermal stratification affects flow in and above urban street canyons. *Atmos. Environ.* 2000; 34(10): 1553–62. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00410-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00410-0)
- Chan T.L., Dong G., Leung C.W., Cheung C.S., Hung W.T. Validation of a two-dimensional pollutant dispersion model in an isolated street canyon. *Atmos. Environ.* 2002; 36(5): 861–72. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00490-3](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00490-3)
- Jicha M., Pospisil J., Křtolic J. Dispersion of pollutants in street canyon under traffic induced flow and turbulence. *Environ. Monit. Assess.* 2000; 65(1–2): 343–51. <https://doi.org/10.1023/A:1006452422885>
- Balakin V.V. The influence of development on the formation of the aeration regime of urban roads and streets. In: *Road Ecology of the XXI Century. Proceedings of the International Scientific and Practical Symposium [Dorozhnaya ekologiya XXI veka. Trudy mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo simpoziuma]*. Voronezh; 2000: 101–9. <https://elibrary.ru/rignsm> (in Russian)
- Assimakopoulos V.D., ApSimon H.M., Moussiopoulos N. A numerical study of atmospheric pollutant dispersion in different two-dimensional street canyon configurations. *Atmos. Environ.* 2003; 37(29): 4037–49. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(03\)00533-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00533-8)
- Vankevich R.V. *Application of methods of system analysis and GIS technologies to the construction of quantitative relationships in the system «motor transport – urban environment – health»*: Diss. St. Petersburg; 2003. (in Russian)
- Kim J.J., Baik J.J. A numerical study thermal effects on flow and pollutant dispersion in urban street canyons. *J. Appl. Meteorol.* 1999; 38(9): 1249–61. <https://clck.ru/35QD4D>
- Nikitin V.S., Maksimkina N.G., Samsonov V.T., Plotnikova L.V. *Ventilation of Industrial Sites and Adjacent Territories [Provetrivanie promyshlennykh ploshchadok i prilgayushchikh k nim territoriy]*. Moscow: Stroyizdat; 1980. (in Russian)
- Balakin V.V. Principles of formation of environmental protection strips of green spaces on city roads and streets. In: *Scientists of Volgograd – the Development of the City. Collection of Articles [Uchenye Volgograda – razvitiyu goroda. Sbornik statey]*. Volgograd; 2009: 109–11. <https://elibrary.ru/vylhbp> (in Russian)