

Пинигин М.А.¹, Сидоренко В.Ф.², Антюфеев А.В.², Балакин В.В.²

Выбор градостроительных решений по снижению загрязнения атмосферного воздуха в жилых районах выбросами автомобильного транспорта

¹ФГБУ «Центр стратегического планирования и управления медико-биологическими рисками здоровью» ФМБА России, 119991, Москва, Россия;²Институт архитектуры и строительства ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» Министерства образования и науки России, 400074, Волгоград, Россия

Введение. Формирование оптимального микроклимата и обеспечение чистоты атмосферного воздуха в жилых районах возможно в градостроительной проектной практике путём регулирования ветрового режима, определяющего в сочетании с температурно-влажностным режимом тепловое состояние человека и качество жилой среды.

Цель исследования — оценка влияния ширины, плотности и приёмов планировки застройки магистральных улиц на аэрационный режим и снижение концентрации выбросов автомобильного транспорта в воздухе жилых территорий.

Материалы и методы. Исследования проведены в натурных условиях на улицах крупных городов и на моделях жилых зданий масштаба 1:20 с использованием чашечных анемометров.

Результаты. Установлены закономерности формирования аэрационного режима и уровня загазованности магистральных улиц при различных приёмах планировки и застройки. Получены зависимости коэффициента трансформации воздушного потока по скорости от ширины улиц и величины разрывов между зданиями. Определены планировочные условия, исключающие вероятность появления замкнутой циркуляции примесей в уличных каньонах. Изучена пространственно-временная динамика загрязнения атмосферного воздуха транспортных коммуникаций в жилых зонах поселений.

Заключение. Гигиенические нормативы содержания выбросов автомобильного транспорта в воздухе жилых районов обеспечиваются оптимальным аэрационным режимом, формируемым путём выбора ширины, положения трассы, этажности, приёмов планировки и плотности застройки магистральных улиц. Одновременно требуется внедрение мероприятий, направленных на снижение валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и исключение очагов атмосферного загрязнения на транспортных сетях городов. При выборе градостроительных решений, обеспечивающих экологическое качество жилой среды поселений в различных географических районах, необходимо учитывать особенности пространственно-временной динамики загрязнения атмосферного воздуха транспортных коммуникаций, обусловленной изменениями метеорологических условий и колебаниями интенсивности движения автомобильного транспорта по часам суток, дням недели и сезонам года.

Ключевые слова: улица; застройка; загрязнение атмосферного воздуха; аэрационный режим

Для цитирования: 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 (1): 92-98. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-2-92-98>

Для корреспонденции: Балакин Владимир Васильевич, кандидат техн. наук, доцент кафедры строительства и эксплуатации транспортных сооружений, Институт архитектуры и строительства ФГБОУ ВО ВолГТУ, 400074, Волгоград, Россия. E-mail: Balakin-its@yandex.ru

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

Благодарность. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов: Пинигин М.А., Антюфеев А.В. — редактирование; Сидоренко В.Ф. — концепция и дизайн исследования, редактирование; Балакин В.В. — концепция и дизайн исследования, сбор и обработка материала, статистическая обработка, написание текста. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Поступила 31.03.2020 / Принята к печати 18.09.2020 / Опубликовано 30.03.2021

Migmar A. Pinigin¹, Vladimir F. Sidorenko², Aleksei V. Antyufeyev², Vladimir V. Balakin²

Architectural choices aimed at reducing the air pollution by vehicle emissions in residential areas

¹Centre for Strategic Planning and Management of Biomedical Health Risks of the Federal Medical Biological Agency, Moscow, 119991, Russian Federation;²Institute of Architecture and Building, Volgograd State Technical University, Volgograd, 400074, Russian Federation

Introduction. The formation of an optimal microclimate and ensuring the purity of atmospheric air in residential areas is possible in urban planning design practice by regulating the wind regime, which determines the thermal state of a person and the quality of the living environment, the temperature and humidity regime.

The aim of the study is to assess the impact of the width, density, and planning techniques of main streets on the aeration regime and reduction of the concentration of motor transport emissions in the air of residential areas.

Material and methods. The research was carried out both in full-scale conditions on the streets of large cities and residential buildings' models at a scale of 1:20 using cup anemometers.

Results. The regularities of the formation of the aeration regime and the level of gas contamination of main streets with different planning and development methods are established. The dependences of the coefficient of air flow transformation in terms of the speed on the width of streets and the size of gaps between buildings are obtained. Planning conditions that exclude the possibility of a closed circulation of impurities in street canyons are determined. The spatial and temporal dynamics of air pollution of transport communications in residential areas of settlements is studied.

Conclusions. Hygienic standards for the content of motor transport emissions in the air of residential areas are provided by the optimal aeration mode, formed by choosing the width, position of the route, number of floors, planning techniques, and density of development of main streets. Simultaneously, it is necessary to introduce measures aimed at reducing the gross emissions of pollutants into the atmosphere and eliminating foci of atmospheric pollution on the transport networks of cities. When selecting urban planning decisions that ensure the environmental quality of the living environment of settlements in different geographical areas, it is

necessary to consider the peculiarities of spatial-temporal dynamics of air pollution by transport and communications, due to changes in meteorological conditions and fluctuations in the intensity of traffic by hour of day, day of week and season of the year.

Keywords: street; buildings; air pollution; aeration mode

For citation: Pinigin M.A., Sidorenko V.F., Antyufeyev 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): 92–98. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-2-92-98> (In Russ.)

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

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

Acknowledgements. The study had no sponsorship.

Contribution of the authors: Pinigin M.A., Antyufeyev A.V. – editing; Sidorenko V.F. – the concept and design of the study, editing; Balakin V.V. – the concept and design of the study, collection and processing of material, statistical processing, writing a text. All co-authors – approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article..

Received: March 03, 2020 / Accepted: September 18, 2020 / Published: March 30, 2021

Введение

Уровень концентрации вредного вещества в воздухе транспортных коммуникаций устанавливается в результате баланса между интенсивностью его поступления в воздушный бассейн и интенсивностью рассеяния в окружающее пространство. Поэтому суточная динамика загрязнения воздуха магистральных дорог и улиц определяется, с одной стороны, изменением интенсивности, скорости и состава транспортных потоков, а с другой – ветровым режимом.

Влияние скорости ветра на концентрацию ведущего компонента отработавших газов автомобильного транспорта – оксида углерода (СО) в воздухе на высоте 1,5 м у края проезжей части магистральной улицы определяется зависимостью [1]:

$$q = A \cdot e^{-\alpha u} \quad (1),$$

где q и u – максимальная разовая концентрация СО в мг/м³ и скорость ветра в м/с в пункте наблюдений; e – основание натуральных логарифмов; A – коэффициент, характеризующий абсолютное значение концентрации СО при штиле, когда $u = 0$; α – коэффициент, учитывающий категорию магистральной улицы (общегородского значения – 0,453; районного – 0,437).

По аналогичной зависимости происходит снижение содержания диоксида азота (NO₂) в воздухе городских улиц при изменении скорости ветра от 0 до 2,5 м/с и интенсивности движения автомобилей в пределах (1–3) • 10³ автомобилей/час [2]. Это подтверждает положение о том, что благодаря турбулентной диффузии происходит полное смешение выбрасываемых газов с воздухом, а «удельный вес газовой смеси становится весьма близким к удельному весу атмосферного воздуха» [3] вследствие её быстрого охлаждения, поэтому в своём движении отдельные компоненты выброса быстро теряют свою индивидуальность. Таким образом, можно утверждать, что на объектах транспортной инфраструктуры закономерности снижения концентрации СО в воздухе с усилением их аэрационного режима характерны для всего комплекса газов, выбрасываемых автомобильным транспортом.

Используя формулу (1), можно дать оценку аэрационного режима проектируемых объектов транспортной инфраструктуры с учётом обеспечения гигиенических нормативов ожидаемого содержания атмосферных загрязнителей. Для этого необходимо обеспечить равенство:

$$\text{ПДК}_j = A \cdot e^{-\alpha u_{\text{ПДК}_j}} \quad (2),$$

где ПДК_j и $u_{\text{ПДК}_j}$ – предельно допустимая максимальная разовая концентрация j -го ингредиента (мг/м³) и скорость ветра (м/с), обеспечивающая его разбавление в воздухе до ПДК.

После деления (1) на (2) и последующего логарифмирования получим:

$$u_{\text{ПДК}_j} - u = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{q_j}{\text{ПДК}_j} \quad (3),$$

где $\frac{q_j}{\text{ПДК}_j}$ – содержание j -го ингредиента в воздухе (единиц ПДК).

Левая часть в уравнении (3) отражает аэрационный ресурс, необходимый для снижения концентрации изучаемого компонента в воздухе до гигиенического норматива градостроительными средствами.

По результатам сплошных натурных обследований в крупных городах установлено, что максимальные разовые ПДК такого компонента, как СО, обеспечиваются на 40–70% протяжённости участков магистральных улиц при скоростях ветра 3–4 м/с [4]. Такие скорости ветра являются комфортными и субкомфортными по классификации погод, предложенной И.С. Кандор и соавт. [5], и дают возможность использовать территории для градостроительного освоения в широком диапазоне температуры и влажности воздуха [6].

При выборе проектных решений по планировке и застройке жилых зон поселений в различных географических районах с учётом ветрового режима необходим индивидуальный подход. Например, в степях, лесостепях, полупустынях и лесотундре, где по преобладающим направлениям отмечаются средние скорости ветра 5–10 м/с, а также сильные ветры со скоростями более 10 м/с, в холодный период года у жителей поселений может возникать напряжение терморегуляции, развиваться холодовой стресс и появляться опасность обморожения [6, 7]. Для защиты жилых территорий от ветра в этих ландшафтных зонах следует использовать ветрозащитные особенности рельефа, застройки и озеленения.

В лесной ландшафтной подзоне в течение года, а также в степной – в тёплый период скорости ветра до 5 м/с не обеспечивают достаточно комфортное проветривание жилых образований. В таёжной ландшафтной подзоне, широколиственных лесах, оазисах и влажных субтропиках летом наблюдаются более низкие средние скорости ветра и штилевое состояние атмосферы. Вследствие этого у жителей поселений из-за напряжения терморегуляции при перегреве в условиях высокой влажности возникают ощущения дискомфорта [6]. Одновременно на улицах городов повышается уровень загрязнения воздуха. Очевидно, актуальной задачей градостроительства здесь является использование приёмов планировки и застройки жилых образований и объектов транспортной инфраструктуры, стимулирующих их эффективное проветривание.

В городах «двух сезонов» [8] – Москве, Волгограде и других – с сухим жарким летом и холодной ветреной зимой требуется всесторонний учёт природно-климатических факторов, предопределяющих строгую индивидуализацию планировочных решений жилых образований. В проектной практике Москвы архитектурно-климатический анализ предусматривает решение двух задач – защиты горожан от ветра зимой и обеспечение эффективного проветривания пешеходных коммуникаций и жилых территорий летом. В Волгограде особенно неблагоприятными в тёплый период являются периодически повторяющиеся сочетания жары со слабыми ветрами и штилем. При высокой температуре воздуха, повышенной влажности и низкой скорости ветра юго-восточного направления в городе ощущается снижение биоклиматической комфортности территории и перегрев внутренней жилой среды в зданиях [9]. Кроме этого, летом наблюдаются суховеи и пыльные бури.

Летом в Волгограде, отличающемся выраженной линейной формой архитектурно-планировочной структуры, особое значение имеет сохранение аэрационного потенциала и мелиоративного влияния акватории р. Волги на микроклимат набережной рекреационной зоны и прилегающей опорной застройки. Для этого лестничные сходы, малые архитектурные формы, объекты озеленения и другие элементы благоустройства располагаются между нижней и верхней террасами набережной по перпендикуляру к береговой линии. Потоки чистого воздуха, восходящие на прибрежную часть города, проникают внутрь планировочных районов по коридорам, формируемым на склоне, а затем — по поперечным улицам (Порт-Саида, Комсомольская, Аллея Героев, Ленина, Огарёва, Баррикадная, Иркутская и др.), а также через разрывы в периметральной застройке кварталов. При слабом ветре этот микроклиматический эффект поддерживается бризовой циркуляцией.

В зимний период в Волгограде особенно неблагоприятны сильные холодные ветры преимущественно восточного и северо-восточного румбов. В таких условиях необходимы ограничения по использованию открытых пространств в рекреационных целях, для пешеходных сообщений и производственно-бытовых процессов. Здесь применяются замкнутые и полужамкнутые жилые группы, открытые к благоприятным румбам (юг или юго-запад), для защиты от холодных ветров детских дошкольных учреждений, школ и других объектов, наиболее чувствительных к переохлаждению.

В общем виде градостроительные средства регулирования ветрового режима обозначены в теоретической модели Ф.Л. Серебровского [10], где учитываются наиболее значимые факторы, воздействующие на трансформацию воздушного потока:

$$u_i = u_0 \cdot K \quad (4),$$

где u_i — скорость ветра в точке i на территории города; u_0 — скорость ветра, измеренная на метеостанции; K — коэффициент трансформации воздушного потока, определяемый по формуле:

$$K = \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 \cdot \tau_4 \quad (5),$$

где τ_1 — коэффициент трансформации, учитывающий воздействие рельефа (гипершероховатости); τ_2 — коэффициент трансформации под воздействием массива застройки (макросшероховатости); τ_3 — коэффициент трансформации под воздействием элементов застройки; τ_4 — коэффициент трансформации под воздействием элементов благоустройства (микросшероховатости).

Согласно (5), воздействие городских улиц на воздушный поток определяется коэффициентом трансформации τ_3 , отражающим изменение скорости и направления ветра под влиянием фрагментов застройки различной этажности и про-

тяжённости вдоль красных линий. Здесь необходимо обратить внимание на тот факт, что застройка улиц в современных городах, состоящая, как правило, из фронтально расположенных многосекционных зданий со всевозможными вставками между ними, образует каньоны, представляющие собой большую экологическую проблему в связи с их недостаточной инсоляцией, аэрацией и повышенным загрязнением воздуха [10–17].

При ветре поперечного направления в уличных каньонах появляются устойчивые рециркуляционные потоки воздуха, сдерживающие рассеяние примесей [11, 17, 18]. Это усложняет задачу обеспечения качества атмосферного воздуха в зонах пешеходного движения и общественных пространствах, формируемых в границах городских улиц в условиях дефицита территории для организации общественной жизни населения [19, 20].

Зоны повышенной концентрации выбросов автомобилей, образующиеся в транспортно-коммуникационных коридорах при поперечном ветре, отличаются пространственно-временной изменчивостью, обусловленной переменным составом и режимом движения транспортных потоков, нестационарностью их функционирования как линейных источников загрязнения. На перенос и рассеяние примесей в атмосфере здесь активно влияют сочетания метеорологических факторов в различные часы суток, дни недели и сезоны года, а также характер застройки и озеленения. В связи с этим первостепенное значение имеет поиск наиболее рациональных архитектурно-планировочных решений застройки магистральных улиц, исключающих случаи опасного загрязнения атмосферного воздуха, связанного с замкнутой циркуляцией выбросов автомобилей и особенностями его пространственно-временной динамики.

Материалы и методы

В соответствии с поставленной целью выполнена анемометрическая съёмка фрагментов застройки городских улиц с применением метода крупномасштабного моделирования. Макеты участков магистралей протяжённостью 15 м ориентировали перпендикулярно преобладающему направлению ветра и компоновали в центре площадки размером 100×100 м из отдельных секций жилых зданий высотой 0,75 м с соотношением высоты, длины и ширины 1:1:0,8, изготовленных в масштабе 1:20 из древесных материалов.

Для измерения скорости ветра в пунктах наблюдений использовали чашечные анемометры МС-13. Согласно заданной точности опыта 5%, измерения повторяли 7 раз. Направление ветра определяли по анеморумбому.

С целью изучения изменения скорости воздушного потока в вертикальном направлении анемометры были закреплены на мачте с анеморумбометром с наветренной стороны полигона на высоте 0,1; 1; 2; 3 и 4 м (рис. 1). Результаты измерений подтвердили логарифмический вертикальный профиль скорости

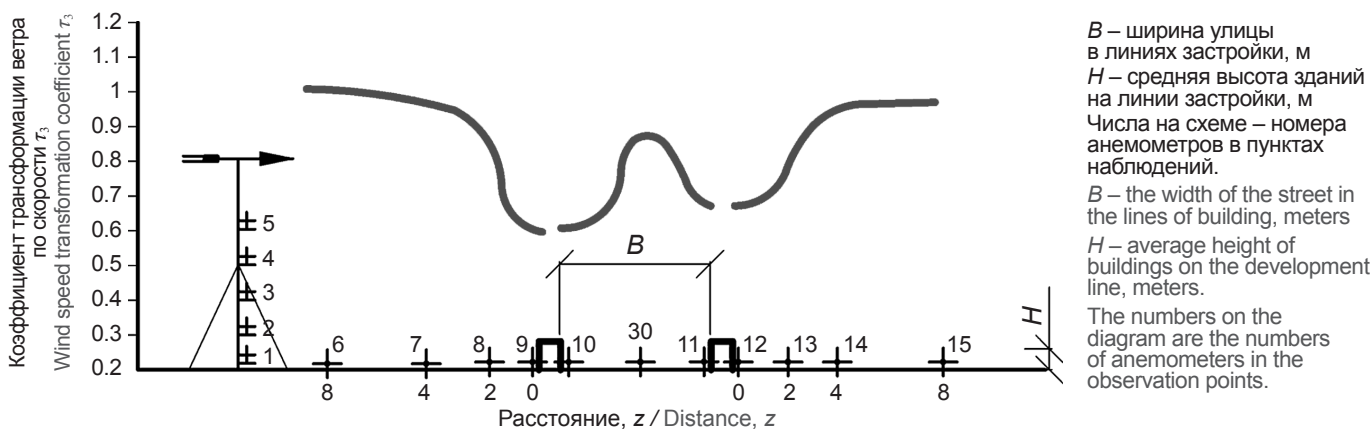


Рис. 1. Схема расстановки анемометров и график изменения относительной скорости ветра по поперечному сечению улицы и прилегающей территории.
Figure 1. Diagram of anemometer placement and a graph of changes in the relative wind speed over the cross-section of the street.

ветра открытой местности, прилегающей к экспериментальной площадке [10].

В эксперименте изменялись ширина улиц и периметральная плотность застройки вдоль красных линий ρ , определяемая по формуле:

$$\rho = \frac{\sum l}{L} \quad (6),$$

где $\sum l$ – общая длина зданий по контуру участка улицы; L – протяжённость периметра участка улицы по линиям регулирования застройки и ширине.

Для характеристики размеров поперечного профиля улиц использовали геометрический показатель [11]:

$$z = \frac{b}{H} \quad (7),$$

где b – среднее расстояние от наветренных стен первого по потоку ряда зданий до осевой линии улицы, м; H – средняя высота зданий по линиям застройки, м.

Кроме этого, проведён выборочный мониторинг загрязнения атмосферного воздуха в летний период в крупном городе III климатической зоны на двух участках магистральных улиц общегородского значения в течение одной недели. Наблюдениям сопутствовала ясная погода при слабо выраженной крупномасштабной циркуляции атмосферы.

Застройка улиц осуществлена 5-этажными многосекционными зданиями с минимальными разрывами. Улицы имеют взаимоперпендикулярную ориентацию продольной оси по румбам С-Ю и В-З и ширину 34 и 60 м соответственно. Зелёные насаждения на разделительных полосах улиц состоят из рядовых посадок деревьев высотой 10–15 м.

В качестве изучаемого компонента выбран СО. Отбор проб воздуха и измерение параметров микроклимата производили над подветренным краем проезжей части на высоте 1,5–2 м в течение суток с интервалами 20 мин. В 2–3-часовые периоды максимальной интенсивности движения автомобилей пробы воздуха отбирали каждые 20 мин при синхронной регистрации микроклиматических факторов. Параллельно регистрировали интенсивность, состав и скорость транспортного потока. Кроме этого, изучали результаты систематических наблюдений, выполняемых в городе на оборудованных стационарных и передвижных постах.

Результаты

Установлены коэффициенты трансформации воздушного потока по скорости τ_3 в пунктах наблюдений при различных приёмах планировки и застройки улиц разной ширины и по-

строены соответствующие корреляционные графики (рис. 2).

Изучена пространственно-временная динамика загрязнения атмосферного воздуха выбросами автомобильного транспорта под влиянием плотности, этажности застройки и направления трассы дорог и улиц, а также суточных колебаний интенсивности движения, температуры и скорости ветра, сезонных изменений метеорологических условий и интенсивности движения.

Обсуждение

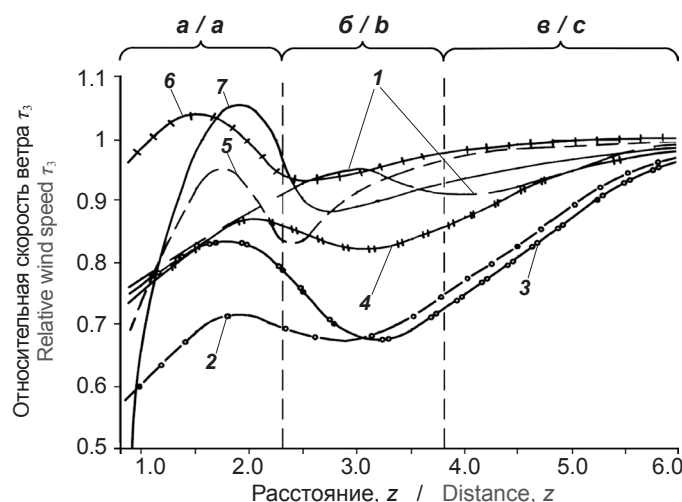
По характеру кривых на рис. 2 видно, что путём изменения длины зданий вдоль линии застройки и величины разрывов между ними имеется возможность регулирования аэрационного режима улиц в широких пределах. Максимальное сохранение исходной скорости ветра (кривая 1) достигается при точечной односекционной застройке ($l = l_0$) при разрывах между зданиями в рядах ($l_p \geq 30$ м), когда застройка и ширина улиц незначительно влияют на их аэрационный режим.

По положению, занимаемому кривыми 2 и 3, видно, что при расстоянии между зданиями ($l_p = l_0 = 15$ м) на улицах шириной $B = (2-4)H$ показатели снижения скорости ветра у точечной застройки выше на 10–15% по сравнению с двухсекционной ($l = 2l_0$). А из сравнения кривых 1 и 2 следует, что на улицах одинаковой ширины скорость ветра можно снизить на 15–30% путём сокращения расстояния между зданиями в два раза.

Повышение ветрозащитного эффекта в застройке связано с появлением за зданиями парных горизонтальных вихрей встречного направления вращения. При увеличении количества таких вихрей по мере размыкания фронтальной застройки их воздействие на снижение скорости ветра над проезжей частью улицы становится более ощутимым, чем у основного вихревого потока, обтекающего здания сверху.

Боковые вихри могут оказать существенное влияние и на характер распределения поллютантов в застройке [21]. Адвекционные потоки, появляющиеся вблизи углов зданий, приводят к образованию зон повышенного загрязнения атмосферного воздуха у середины их подветренных фасадов.

При уменьшении количества разрывов в застройке по длине улицы влияние горизонтальных вихрей на снижение скорости ветра становится менее значимым. Это наблюдается при переходе от точечной застройки к 2–4-секционной ($l \geq 2l_0$), а затем и сплошной фронтальной застройке улиц при их ширине $B = (0,8-2,8)H$ ($z = 1,2-2,2$) – кривые 2, 3, 5, 6 на рис. 2. В данном случае по мере повышения плотности фронтальной застройки происходит повышение скорости ветра, связанное с формированием устойчивой обратной циркуляции основного воздушного потока в уличном



- 1 – $\delta = 0.64$ ($l_p = 2l_0$; $l = l_0$)
- 2 – $\delta = 0.47$ ($l_p = l_0$; $l = l_0$)
- 3 – $\delta = 0.30$ ($l_p = l_0$; $l = 2l_0$)
- 4 – $\delta = 0.46$ ($l_p = 2l_0$; $l = 2l_0$)
- 5 – $\delta = 0.21$ ($l_p = l_0$; $l = 3l_0$)
- 6 – $\delta = 0.16$ ($l_p = l_0$; $l = 4l_0$)
- 7 – $\delta = 0$ ($l_p = 0$; $l = 20l_0 = l$)
- $\delta = 1 - \rho$

l_0 – длина секции, м
 l – длина здания, м
 l_p – величина разрыва между зданиями, м
 L – протяжённость участка улицы, м
 l_0 – section length, m
 l – is the length of the building, m
 l_p – the size of the gap between buildings, m
 L – is the length of the street section, m

Рис. 2. Зависимость относительной скорости ветра τ_3 от критерия z на улицах с различной долей разрывов между зданиями δ . Обтекание зданий воздушным потоком: а – «по огибающей»; б – турбулентно-струйное; в – изолированное.

Figure 2. Dependence of the relative wind speed τ_3 on the criterion z on the streets with different proportion of gaps between buildings. Air flow around buildings: а – «along with the envelope»; б – turbulent-jet flow; в – isolated.

каньоне [14, 21]. При предельном уплотнении застройки ($l = L$) коэффициент трансформации воздушного потока по скорости τ_z достигает значения 1,07 (кривая 7), что согласуется с результатами подобных исследований [17], где между промышленными зданиями при $B = (2-3)H$ были зафиксированы максимальные скорости ветра из-за устойчивого вихря круглоцилиндрической формы.

Как следует из результатов исследований К. Уехары и соавт. [18], связанных с визуализацией воздушного потока, наиболее сильный и устойчивый вихрь между зданиями образуется при $B = (1-2)H$, что в нашем эксперименте соответствует параметру $z = 1,3-1,8$ (см. рис. 2). В соответствии с классификацией режимов движения воздушных потоков в застройке, сформулированной Байком и Кимом [15], при такой ширине улицы основной воздушный поток находится в режиме обтекания «по огибающей» (см. рис. 2, а). В данной ситуации он не заходит в узкий промежуток между зданиями, а только передаёт импульс движения полостному вихревому потоку, поддерживая его вращение. Возникающая при этом замкнутая циркуляция примесей приводит к повышению загрязнения атмосферного воздуха.

При $B > 3H$, согласно [22], вихрь между зданиями приобретает эллиптическую форму. При этом наблюдается, как это видно по ходу кривых на рис. 2, плавное снижение скорости его вращения. Затем, при значениях z в интервале от 2,3 до 2,5, происходит разрыв единой циркуляционной зоны между зданиями с образованием двух вихрей. За первым зданием образуется замкнутый вихрь низкого давления, а перед подветренным зданием в зоне подпора появляется упругий рециркуляционный вихревой поток высокого давления. В результате их взаимодействия при значениях $z = 2,3-3,8$ или $B = (3-6)H$ на улицах с различными типами застройки происходит дальнейшее снижение скорости ветра до локального минимума. В данном случае наблюдается турбулентно-струйный режим обтекания параллельно стоящих зданий [15] (см. рис. 2, б). Как следует из результатов натуральных наблюдений, при таком режиме обтекания, несущественной разнице в выбросе СО (15,7%) и одинаковой 5-этажной застройке ($H = 15$ м) на улице шириной 60 м ($B = 4H$) складываются более благоприятные условия для рассеяния примесей по сравнению с улицей шириной 34 м ($B = 2,3H$). Концентрация СО в воздухе здесь ниже на 42%. Это согласуется с результатами численных экспериментов [21], где установлено наиболее эффективное рассеяние примесей на улицах шириной $B > 3H$.

С последующим увеличением ширины улиц B в интервале $(6-10)H$ между вихрями низкого и высокого давления и за подветренным зданием происходит восстановление скорости основного воздушного потока (см. рис. 1). А при $B > 10H$ или $z > 5,8$ характер движения воздушного потока приобретает признаки изолированного обтекания зданий [15] (см. рис. 2, в).

В каньонах малой ширины (при $z < 1,3$ или $H/B > 1$) наблюдается резкое падение скорости ветра (кривая 7), связанное с разделением единичного вихря в вертикальном направлении. При $H/B = 1,5-2,5$ в верхней и нижней частях каньонов образуются два вихря, а при $H/B \geq 3,5$ в верхней, средней и нижней частях возникают три вихря противоположных направлений вращения [15].

При увеличении глубины каньонов и числа вихрей концентрация отработавших газов в воздухе у проезжей части повышается. В этом случае ветровой поток над крышами зданий, находящийся в режиме обтекания «по огибающей» [15], препятствует выносу ингредиентов из уличного пространства. Согласно численным экспериментам Lee I.Y. и Park H.M [23], наиболее эффективно загрязняющие вещества выдуваются из каньонов малой глубины с одним вихрем. В каньонах с двумя вихрями перемещение ингредиентов от источника вверх обеспечивается процессом диффузии. Как видно по корреляционным графикам 1–6 на рис. 2, проветривание улиц малой ширины при зна-

чении $z < 1$ ($H/B > 2,5$) может быть обеспечено за счёт разрывов между зданиями по линиям застройки.

Из пространственно-временного анализа загрязнения атмосферного воздуха транспортных коммуникаций следует, что в суточном разрезе изменение концентрации СО связано главным образом с колебаниями интенсивности движения транспортных потоков и скорости ветра. Пикам дневного хода интенсивности движения автомобилей с 8 до 10 и с 16 до 18 ч соответствует максимальный уровень загазованности воздушного бассейна улиц, отмечаемый в 9–10 и 17–18 ч, причём более выражен утренний максимум концентрации СО. Роль ветра в рассеянии данной примеси наиболее отчётлива в дневные часы, когда нарушается устойчивость атмосферы вследствие прогрева земной поверхности и нижнего слоя воздуха.

На улицах меридианальной ориентации продольной осью при отсутствии циркуляции крупного масштаба с 7 до 10 ч подвижность воздуха незначительна и обусловлена турбулизацией воздушных масс движущимися транспортными средствами. В этот период в уличных каньонах отсутствуют температурные контрасты и конвективный теплообмен. Вертикальный градиент температуры имеет минимальное значение, так как солнечные лучи не проходят к земной поверхности из-за препятствий в виде вершин деревьев и плотной фронтальной застройки. Из-за сильного прогрева крыш зданий над улицами образуется тёплый инверсионный слой воздуха, препятствующий вертикальному перемешиванию воздушных масс, что способствует «явлению застоя воздуха» [24]. По этой причине утренний максимум загрязнения воздуха на магистральных улицах в весенне-летний период превышает вечерний.

На улицах, ориентированных продольной осью по широте, солнечные лучи проникают на проезжую часть на 1–2 ч раньше, чем на улицах меридианальной ориентации. После этого благодаря высокой способности к поглощению тепла происходит резкое повышение эквивалентной температуры дорожного покрытия [25]. Поверхность асфальта нагревается на 7–9 °С больше, чем газона, и на 12–14 °С больше, чем листва деревьев [26]. Очаги прохлады, формирующиеся в кронах древесных растений, усиливают конвективный теплообмен и стимулируют появление вертикальных восходящих потоков воздуха над проезжей частью. В результате замещения этих потоков нисходящими токами воздуха, возникающими в кронах деревьев из-за более низкой температуры воздуха, происходит быстрое самоочищение воздушного бассейна улицы — достигнув максимума в 10 ч, концентрации СО резко снижаются до локального минимума, отмечаемого ближе к 11 ч в суточном цикле.

В динамике загрязнения воздуха в течение недели минимальные значения разовых концентраций отмечаются в выходные дни, а максимальные приходятся на пятницу и превышают средний уровень загрязнения в 1,2–1,4 раза. Это связано с повышением активности горожан, выезжающих из города в целях реализации еженедельного отдыха. Поэтому в конце рабочей недели на вылетных направлениях городских дорог образуются плотные потоки легкового автомобильного транспорта.

Неравномерность распределения концентраций СО по месяцам года обусловлена сезонными изменениями метеорологических условий и интенсивности движения автомобилей на улично-дорожной сети. Штилевая погода, приземные инверсии и туманы способствуют накоплению ингредиентов в приземном слое в холодный период. Совокупность метеорологических факторов с незначительным числом приземных инверсий, повышенной турбулентностью и осадками способствует более интенсивному рассеянию примесей в тёплый период. Вместе с этим наблюдается увеличение средних концентраций СО с мая по август. Это связано с увеличением объёмов перевозок автомобильным транспортом строительных грузов, сельскохозяйственной продукции и ростом интенсивности движения индиви-

дуальных автомобилей в период массовых отпусков и автотуризма, причём наиболее концентрированные потоки легковых автомобилей наблюдаются в центральных планировочных зонах городов.

Заключение

Снижение загрязнения атмосферного воздуха в жилых районах может обеспечиваться выбором этажности, приёмов планировки и плотности застройки, ширины и положения трассы транспортных коммуникаций с возможностью регулирования аэрационного режима в пределах комфортных классов погод.

Наиболее эффективное рассеяние выбросов автомобилей с исключением вероятности замкнутой циркуляции происходит при ширине улицы $B > 3H$. Это может служить основанием для назначения минимальной ширины магистральных улиц различных категорий в пределах трёх-четырёх высот зданий для обеспечения необходимого качества атмосферного воздуха в зонах пешеходного движения и общественных пространствах.

В ландшафтных зонах, имеющих выраженный сезонный характер изменения климатических факторов, при выборе планировочных решений жилых районов в поселениях необходимо учитывать особенности решения задач по формированию благоприятного микроклимата и охране атмосферного воздуха от загрязнения, возникающих в разные периоды года. В городах, где в холодный период отмечаются средние скорости ветра 5–10 м/с и более сильные ветры, для защиты жилых образований от переохлаждения следует использовать неровности рельефа, крупные массивы озеленения, замкнутые или полужамкнутые группы жилых зданий и объектов нежилого назначения. В городах с преобладанием в летний период низких скоростей ветра и штилевой погоды возможно использование мелиоративного влияния рельефа и акваторий на микроклимат с учётом горно-долинной и бризовой циркуляции, а также объёмно-планировочных решений городской застройки, обеспечивающих максимальное сохранение скорости ветра. В таких условиях наиболее рациональной ориентацией магистральных улиц в продольном направлении следует считать широтную, обеспечивающую усиление скорости ветра и более интенсивное рассеяние выбросов автомобильного транспорта в допуденное время.

На улицах меридианальной ориентации с плотной фронтальной застройкой рассеяние примесей сдерживается в утренние часы из-за отсутствия вертикального теплообмена, малой скорости ветра и инверсионного запирающего слоя воздуха в приземном слое атмосферы. Для более эффективного прогрева земной поверхности в утренние часы и очищения воздушного бассейна на улицах, ориентированных по меридиану, следует ограничивать использование фронтальной застройки многосекционными зданиями с минимальным числом разрывов, применять приёмы свободной застройки с переменной этажностью зданий, смещением их в рядах и достаточным отступом от проезжей части.

Изменение уровня загрязнения воздуха на объектах транспортной инфраструктуры по дням недели при несущественной смене погодных факторов связано с колебаниями интенсивности движения индивидуального автомобильного транспорта. Исключение случаев опасного загрязнения, связанного с систематическими заторами, возникающими в рабочие дни недели на отдельных участках магистральных дорог и улиц, возможно путём использования средств оперативной организации дорожного движения (выделение реверсивных полос, запрещение движения тяжёлых грузовых автомобилей и др.).

В динамике атмосферного загрязнения транспортной сети города по месяцам повышение максимальных и средних концентраций СО наблюдается в тёплый период. Это связано с активным использованием грузового автомобильного транспорта в хозяйственной деятельности и ростом интенсивности движения индивидуальных легковых автомобилей. В связи с этим следует ограничивать проезд по магистральным улицам транзитного автомобильного транспорта путём строительства объездных дорог на внеселитебных территориях и в пригородной зоне.

Одновременно с этим требуется модернизация городских транспортных систем с повышением эксплуатационной скорости и комфортабельности всех видов массового пассажирского транспорта, формированием системы транспортно-пересадочных узлов, оборудованных парковками на въездах в город и общегородской центр. В таких условиях владельцы автомобилей имеют возможность совершать комбинированные поездки с использованием скоростного внеуличного общественного транспорта, что ведёт к снижению валового выброса вредных веществ в атмосферу и оздоровлению жилой среды.

Литература

(п.п. 12, 15, 17, 18, 21, 23 см. References)

- Балакин В.В. Влияние ветрового режима на очищение воздуха магистральных улиц от выбросов автотранспорта. *Гигиена и санитария*. 1980; 59(6): 5–8.
- Фельдман Ю.Г. *Гигиеническая оценка автотранспорта как источника загрязнения атмосферного воздуха*. М.: Медицина; 1975.
- Андреев П.И. *Рассеяние в воздухе газов, выбрасываемых промышленными предприятиями*. М.: Госиздат; 1952.
- Балакин В.В. Расчет загрязнения атмосферного воздуха на застраиваемых участках городских дорог. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. Серия: *Строительство и архитектура*. 2010; (18): 138–43.
- Кандрор И.С., Демина Д.М., Ратнер Е.М. *Физиологические принципы санитарно-климатического районирования территории СССР*. М.: Медицина; 1974.
- Методические рекомендации по гигиеническому обоснованию размещения и развития производительных сил на территориях нового освоения и в промышленно развитых регионах. М.; 1983.
- Градостроительство (справочник проектировщика)*. М.: Стройиздат; 1978.
- Егорычев О.О., Дуничкин И.В. Вопросы прогнозирования микроклимата городской среды для оценки ветроэнергетического потенциала застройки. *Вестник Московского государственного строительного университета*. 2013; (6): 123–31.
- Мягков М.С. Пример моделирования микроклиматических условий для г. Волгограда. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. Серия: *Строительство и архитектура*. 2013; (32): 220–8.
- Серебровский Ф.Л. *Аэрация населенных мест*. М.: Стройиздат; 1985.
- Реттер Э.И. *Архитектурно-строительная аэродинамика*. М.: Стройиздат; 1984.
- Каменецкий Е.С. Концентрация загрязняющих веществ в уличном каньоне с разной высотой домов по сторонам улицы. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки*. 2008; (6): 31–5.
- Нутерман Р.Б., Старченко А.В. Моделирование распространения загрязнения воздуха в уличном каньоне. *Оптика атмосферы и океана*. 2005; 18(8): 649–57.
- 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., Сидоренко В.Ф. Защита пешеходных зон и жилой застройки от выбросов автомобильного транспорта средствами озеленения. *Жилищное строительство*. 2016; (5): 3–8.
- Данилина Н.В., Теплова И.Д. «Устойчивая» улица — формирование общественных пространств на городских улицах. *Экология урбанизированных территорий*. 2018; (4): 74–80. <https://doi.org/10.24411/1816-1863-2018-14074>
- Томсон Н.М. *Аэрация городской застройки*. М.; 1947.
- Лазарева Е.О., Попова Е.С. Особенности пространственно-временной динамики антропогенных примесей воздуха г. Санкт-Петербурга за период времени с 1980 по 2012 г. (на примере оксида углерода, диоксида азота, взвешенных веществ). *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. 2014; (37): 204–15.
- Самодурова Т.В., Бакланов Ю.В. Влияние солнечной радиации на температурный режим дорожного покрытия. *Труды Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2015; (2): 308–14.
- Гиясов А., Баротов Ю.Г. Роль зеленых насаждений в оздоровлении микроклимата городской застройки южных районов СНГ. *Экология урбанизированных территорий*. 2018; (3): 90–7. <https://doi.org/10.24411/1816-1863-2018-13090>

References

- Balakin V.V. Impact of wind pattern on the air purification of main streets from vehicles' emissions. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 1980; 6: 5–8. (in Russian)
- Fel'dman Yu.G. *Hygienic Assessment of Vehicles as a Source of Air Pollution* [Gigienicheskaya otsenka avtotransporta kak istochnika zagryazneniya atmosferynoy vozdukh]. Moscow: Meditsina; 2013. (in Russian)
- Andreev P.I. *Dispersion of Air Gases Emitted by Industrial Enterprises* [Rasseyaniye v vozdukh gazov, vybrasyvaemykh promyshlennymi predpriyatiyami]. Moscow: Gosizdat; 1952. (in Russian)
- Balakin V.V. Calculation of atmospheric air pollution within urban roads framed with buildings. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2010; (18): 138–43. (in Russian)
- Kandror I.S., Demina D.M., Ratner E.M. *Physiological Principles of Sanitary and Climatic Zoning on the USSR Territory* [Fiziologicheskie printsipy sanitarno-klimaticheskogo rayonirovaniya territorii SSSR]. Moscow: Meditsina; 1974. (in Russian)
- Methodical recommendations on the hygienic justification for the location and development of production forces in the territories of new development and in industrially developed regions. Moscow; 1983. (in Russian)
- Urban Planning (Designer's Guide)* [Gradostroitel'stvo (spravochnik proektirovshchika)]. Moscow: Stroiizdat; 1978. (in Russian)
- Egorychev O.O., Dunichkin I.V. Climate projections for the urban environment in the assessment of the wind energy potential of buildings. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta*. 2013; (6): 123–31. (in Russian)
- Myagkov M.S. Example of modelling of microclimatic conditions for Volgograd. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2013; (32): 220–8. (in Russian)
- Serebrovskiy F.L. *Aeration of Populated Areas* [Aeratsiya naselednykh mest]. Moscow: Stroyizdat; 1985. (in Russian)
- Retter E.I. *Architectural and Construction Aerodynamics* [Arkhithekturno-stroitel'naya aerodinamika]. Moscow: Stroyizdat; 1984. (in Russian)
- Addison P.S., Currie J.I., Low D.J., McCann J.M. An integrated approach to street canyon pollution modeling. *Environ. Monit. Assess.* 2000; 65(1–2): 333–42.
- Kamenetskiy E.S. Pollutant concentration in urban canyon with a buildings height differences at the sides of the street. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Estestvennye nauki*. 2008; (6): 31–5. (in Russian)
- Nuterman R.B., Starchenko A.V. Air pollution spread modeling in a street canyon. *Optika atmosfery i okeana*. 2005; 18(8): 649–57. (in Russian)
- Baik J.J., Kim J.J. A numerical study flow and pollutant dispersion characteristics in urban street canyons. *J. Appl. Meteorol.* 1999; 38(11): 1576–89. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1999\)038%3C1576:ANSOFA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1999)038%3C1576:ANSOFA%3E2.0.CO;2)
- Nikitin V.S., Maksimkina N.G., Samsonov V.T., Plotnikova L.V. *Aeration of Industrial Sites and Areas adjacent to Them* [Provetrivaniye promyshlennykh ploshchadok i prilegayushchikh k nim territoriy]. Moscow: Stroiizdat; 1980. (in Russian)
- Hassan A.A., Crother J.M. Modelling of fluid flow and pollutant dispersion in a street canyon. *Environ. Monit. Assess.* 1998; 52: 281–97. <https://doi.org/10.1023/A:1005928630000>
- Uehara K., Murakami S., Oikawa S., Wakamatsu S. Wind tunnel evaluation of flow fields within streets canyons with thermal stratification. *J. Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transaction of AIJ)*. 1998; 510: 37–44.
- Balakin V.V., Sidorenko V.F. Use of protective planting against car emissions in residential areas and pedestrian zones. *Zhishchnoye stroitel'stvo*. 2016; (5): 3–8. (in Russian)
- Danilina N.V., Teplova I.D. «Sustainable» street - formation public spaces on city streets. *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy*. 2018; (4): 74–80. <https://doi.org/10.24411/1816-1863-2018-14074> (in Russian)
- Baik J.J., Kim 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://doi.org/10.1175/1520-0450\(1999\)038%3C1249:ANSOTE%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1999)038%3C1249:ANSOTE%3E2.0.CO;2)
- Tomson N.M. *Aeration of Urban Area* [Aeratsiya gorodskoy zastroyki]. Moscow; 1947. (in Russian)
- Lee I.Y., Park H.M. Parametrization of the pollutant transport and dispersion in urban street canyons. *Atmos. Environ.* 1996; 28(14): 2343–9. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)90488-X](https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)90488-X)
- Lazareva E.O., Popova E.S. Features of spatial-temporal dynamic of anthropogenic impurities of air in St. Petersburg during the period of 1980–2012 (on the example of carbon oxide, nitrogen dioxide, suspended particles). *Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. 2014; (37): 204–15. (in Russian)
- Samodurova T.V., Baklanov Yu.V. The influence of solar radiation on the temperature mode of the road pavement. *Trudy Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2015; (2): 308–14. (in Russian)
- Giyasov A., Barotov Yu.G. The role of green spaces in improving the microclimate of urban development in the southern regions of the CIS. *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy*. 2018; (3): 90–7. <https://doi.org/10.24411/1816-1863-2018-13090> (in Russian)