

Айкашев В. Д.

## ВЛИЯНИЕ АЭРАЦИОННОГО РЕЖИМА НА УРОВЕНЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА ГОРОДОВ

Экологическая ситуация в городах Южного Урала характеризуется крайне высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха. Наряду с увеличением объемов выбросов в атмосферу, этому способствует возникновение неблагоприятных метеоусловий.

Одним из основных факторов образования высокого уровня загрязнений является возникновение на территории населенных мест слабых ветров, образующихся в результате воздействия на ветровой поток городской застройки.

Действующая методика расчета концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе учитывает влияние на ветровой поток только форм рельефа местности. Современная застройка городов, характеризующаяся большой высотой зданий и высокой плотностью их размещения, по степени влияния сопоставима с рельефом местности. Однако этот фактор никак не учитывается в расчетах концентрации загрязнения воздуха в атмосферном воздухе и мест образования повышенных концентраций.

В архитектурно-строительной аэродинамике разработаны методы расчета трансформации воздушного потока, обтекающего различные виды подстилающей поверхности: рельефа местности, застройки города в целом, элементов застройки и микрошероховатостей. Влияние каждого из факторов характеризуется коэффициентом трансформации воздушного потока. Комплексное влияние подстилающей поверхности наряду с коэффициентом трансформации оценивается также размером зоны влияния.

В статье приведены сведения о размерах зон с пониженными скоростями ветра, образующихся под влиянием застройки населенного места в целом, а также отдельных видов зданий и коэффициентах трансформации в этих зонах.

Кроме изменения скорости ветра городская застройка может существенно изменить и направление ветровых потоков за счет образования в ней циркуляционных вихрей.

Таким образом, при расчете концентрации загрязнения воздуха необходимо учитывать изменение скорости и направления ветра под воздействием подстилающей поверхности на территории городской застройки.

**Ключевые слова:** архитектурно-строительная аэродинамика, городская застройка, загрязняющие вещества, подстилающая поверхность, трансформация воздушных потоков, рельеф местности.

Aikashev V. D.

## THE EFFECT OF THE AERATION MODE ON THE LEVEL OF URBAN AIR POLLUTION

The ecological situation in the Southern Ural cities is characterized by an extremely high level of atmospheric air pollution. Along with the increase in emissions to the atmosphere, this is facilitated by the emergence of unfavorable weather conditions.

One of the main factors for the formation of a high level of pollution is the emergence

*of weak winds in the populated territory, resulting from the impact of urban development area on the wind flow.*

*The current methodology for calculating the concentration of pollutants in the atmospheric air takes into account the influence on the wind flow of only the forms of the terrain. Modern urban development characterized by a large height of buildings and high density of their location, is comparable to the terrain in the degree of its influence. However, this factor is not taken into account in calculations of the concentration of pollutants in the atmospheric air and places of formation of elevated concentrations.*

*In the architectural and construction aerodynamics, methods have been developed for calculating the transformation of the air flow around different types of underlying surface: terrain, urban development in general, building elements, and microroughnesses. The influence of each of the factors is characterized by the coefficient of airflow transformation. The complex influence of the underlying surface along with the transformation coefficient is also estimated by the size of the zone of influence.*

*The paper gives information on the size of zones with low wind speeds, formed under the influence of the development of the inhabited place as a whole, as well as of certain building types and the transformation coefficients in these zones.*

*In addition to changes in wind speed, urban development can significantly change the direction of a wind flow due to the formation of circulation vortices in it.*

*Thus, when calculating the concentration of pollutants, it is necessary to take into account the change in wind speed and direction under the influence of the underlying surface in the urban area.*

**Keywords:** *architectural and construction aerodynamics, urban development, pollutants, underlying surface, airflow transformation, terrain relief.*

В последние года в Челябинске, Магнитогорске и других городах Южного Урала сложилась крайне неблагоприятная экологическая ситуация, характеризующаяся высоким уровнем загрязнения воздушного бассейна выбросами промышленных предприятий и транспорта.

К образованию этой ситуации привело несколько факторов:

- исторически сложившееся размещение промышленных предприятий черной и цветной металлургии, энергетики и машиностроения вблизи жилой застройки;

- возникновение на территории существующих предприятий многочисленных низких источников выброса; их хаотичное размещение без учета вклада в общий уровень загрязнения;

- значительное увеличение (до 50%) вклада автомобильного транспорта в общий уровень загрязнения;

- уплотнение жилой застройки, препятствующее проветриванию и выведению загрязняющих веществ (ЗВ) из приземного слоя;

- повсеместное уменьшение санитарно-защитных зон, передача этих территорий под промпредприятия, складские и транспортные сооружения;

В Челябинской области насчитывается

более 15 тысяч промышленных предприятий, выбрасывающих в атмосферу ЗВ. Около 600 предприятий, имеющих в совокупности более 24 тысяч стационарных источников выброса, оказывают наибольшее воздействие на загрязнение воздуха (около 75%). В совокупности выбросы в атмосферу от промышленности и транспорта составляют более 1,5 млн. тонн в год. С учетом того, что на протяжении многих лет часть ЗВ оседает на подстилающей поверхности, не рассеивается за пределы городских территорий и за счет локальных ветровых потоков циркулирует внутри городской застройки, только ухудшает экологическую ситуацию в населенных местах.

Кроме того, неблагоприятная ситуация с загрязнением атмосферного воздуха связана с участвовавшими случаями возникновения на Южном Урале неблагоприятных метеорологических условий, препятствующих рассеиванию и выведению ЗВ. Согласно источникам [1,2], к неблагоприятным метеорологическим условиям относятся очень слабые ветры и штили, неблагоприятные направления ветра, возникновение скорости ветра близкой к опасной скорости ветра для основных источников выброса, приземные или низкие приподнятые инверсии, туманы, высокая температура воздуха.

Несмотря на то, что территория Южного Урала не относится к территориям с преобладанием ветра с низкой скоростью 0–1 м/с (повторяемость таких ветров 20–40% в год), тем не менее, на территории городов наблюдаются такие условия, препятствующие рассеиванию ЗВ. Как правило, это связано с возникновением локальных условий для низкоскоростных ветров, образующихся в условиях застройки высокой или повышенной плотности.

В целом, именно ветер является определяющим фактором, способствующим переносу и рассеиванию ЗВ в атмосфере. Скорость ветра и его повторяемость определяют уровень загрязнения атмосферы, места возникновения зон повышенной концентрации ЗВ, частоту повторяемости неблагоприятных ситуаций, а также интенсивность рассеивания ЗВ.

Согласно «Методикам расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе (МРР – 2017) [6] максимальная приземная разовая концентрация ЗВ при выбросе газовойоздушной смеси из одиночного точечного источника выброса с круглым устьем достигается при опасной скорости ветра  $U_m$  на расстоянии  $X_m$  от источника и определяется следующим образом:

где  $A$  – коэффициент, зависящий от тем-

$$C_m = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot t \cdot n \cdot \eta}{H^2 \cdot \sqrt[3]{V_1 \cdot \Delta T}};$$

пературной стратификации атмосферы, определяющий условия горизонтального и вертикального рассеивания ЗВ в атмосферном воздухе;

$M$  – масса ЗВ, выбрасываемых в атмосферный воздух в единицу времени (мощность выброса);

$F$  – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания ЗВ в атмосферном воздухе;

$t$  и  $n$  – безразмерные коэффициенты, учитывающие условия выброса из устья источника выброса;

$\eta$  – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности;

$H$  – высота источника выброса;

$V_1$  – расход газо-воздушной смеси;

$\Delta T$  – разность между температурой, выбрасываемой газо-воздушной смеси, и температурой атмосферного воздуха.

Опасная скорость ветра  $U_m$  на уровне флюгера 10 м, при которой достигается наибольшая приземная концентрация загрязнения воздуха  $C_m$ , принимается:

$$U_m = 0,5 \text{ при } v_m \leq 0,5;$$

$$U_m = v_m \text{ при } 0,5 < v_v \leq 2;$$

$$U_m = v_m \cdot (1 + 0,12\sqrt{f}) \text{ при } v_v > 2;$$

где  $v_m$  и  $f$  – параметры, характеризующие источник выброса.

Максимальная приземная концентрация ЗВ при скорости ветра  $U$ , отличающейся от опасной скорости ветра  $U_m$ , определяется по формуле:

$$C_{mu} = r \cdot C_m,$$

где  $r$  – безразмерная величина, рассчитываемая от скоростей ветра  $U$  и  $U_m$ .

Влияние рельефа местности учитывается коэффициентом  $\eta$ . В случае ровной или слабопересеченной местности. Если возле источника выброса можно выделить отдельные формы рельефа (гряды, гребень, ложбину, уступ), то коэффициент  $\eta$  определяется по формуле:

$$\eta = 1 + \varphi_1(\eta_m - 1).$$

Таким образом, единственный фактор, учитываемый при расчете рассеивания ЗВ, является рельеф местности. Однако, застройка современного города при средней высоте 30 м и более сопоставима по влиянию на скорость и направление ветра рельефа местности. Не учет этого фактора, способного существенно повлиять на движение ветрового потока, не позволит достоверно определить места образования максимальных концентраций ЗВ.

Кроме того, на территории жилой застройки образуются зоны пониженных скоростей ветра, отсутствие циркуляции в которых ведет к замедленному выведению ЗВ.

Теоретической основой построения вертикального профиля скорости ветрового потока с учетом влияния шероховатости подстилающего слоя является уравнение Тейлора:

$$U_z = \frac{U_*}{X} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right),$$

где  $U_*$  – степень геострофического ветра;

$X$  – постоянная Кармана;

$z_0$  – параметр шероховатости, определяемый согласно уравнением Леттау:

$$z_0 = \frac{1}{2} \frac{H \cdot a}{A},$$

где  $H$  – эффективная высота препятствия;

$a$  – площадь эффективного сечения;

$A$  – горизонтальная площадь препятствия.

В градостроительной аэродинамике применяется более простое выражение для пересчета скорости ветра  $V_0$  на высоте флюгера  $h_0$  к скорости ветра  $V$  на некой высоте  $h$  [4]:

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^{\frac{1}{n}},$$

где  $n$  – безразмерная величина, принимаемая в зависимости от шероховатости подстилающего слоя.

Согласно теоретической модели, предложенной Ф. Л. Серебровским [3], скорость ветра на территории города под воздействием подстилающего слоя определяется из следующего выражения:

$$V_i = V_0 \cdot k,$$

где  $k$  – коэффициент трансформации:

$$k = \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 \cdot \tau_4;$$

где  $\tau_1$  – коэффициент трансформации под воздействием рельефа;

$\tau_2$  – коэффициент трансформации под воздействием застройки в целом (макрошероховатость);

$\tau_3$  – коэффициент трансформации под воздействием элементов застройки;

$\tau_4$  – коэффициент трансформации под воздействием микрошероховатости (деревья, трава и т.д.).

В данном выражении коэффициент трансформации рассматривается как константа и не изменяется с высотой. Однако, воздействие различных видов шероховатостей и рельефа на ветровой поток не однозначно и различно сказывается по степени влияния на скорость ветрового потока.

Например, при рассмотрении задач, связанных рассеиванием ЗВ из высоких точечных источников, влиянием последних двух факторов можно пренебречь, поскольку высота их воздействия значительно ниже высоты самого токсичного источника и высоты факела рассеивания ЗВ. При рассмотрении задач, связанных с выбросами из низких источников, необходимо учитывать все четыре фактора.

Поэтому формулу трансформации ветрового потока можно записать следующим выражением:

$$k = F_1\left(\frac{\tau_1}{h_1}\right) \cdot F_2\left(\frac{\tau_2}{h_2}\right) \cdot F_3\left(\frac{\tau_3}{h_3}\right) \cdot F_4\left(\frac{\tau_4}{h_4}\right),$$

где  $h_1, h_2, h_3, h_4$  – высота зоны влияния соответствующего фактора.

Проиллюстрируем на примере степень влияния на скорость ветрового потока различных элементов и приемов застройки.

Например, при обтекании ветровым потоком отдельно стоящего линейного здания вокруг него образуются три зоны, потеря скорости ветра в которых составляет 5-10% не более по отношению к скорости ветра на открытой местности:

- зона подпора воздушного потока перед зданием имеет следующие размеры: длина зоны  $L_1=(3...4)H_{зд}$ , высота  $H_1=(1...1,8)H_{зд}$ , средний коэффициент трансформации  $\tau_3 = 0,65$ ;

- циркуляционная зона за зданием:  $L_2=(6...8)H_{зд}$ ,  $H_2=(1,5...2,5)H_{зд}$ , средний коэффициент трансформации  $\tau_3 = 0,50$ ;

- зона следа  $L_3=(17...22)H_{зд}$ ,  $H_3=(2...3)H_{зд}$ , средний коэффициент трансформации  $\tau_3 = 0,80$ ; где  $H_{зд}$  – высота здания.

При обтекании воздушным потоком зданий плоской протяженной формы также можно выделить эти три зоны:

- зона подпора, имеющая размеры  $L_1=(1,5...2)H_{зд}$ ,  $H_1=(1...1,8)H_{зд}$ , средний коэффициент трансформации  $\tau_3 = 0,70$ ;

- циркуляционная зона за зданием:  $L_2=(10...12)H_{зд}$ ,  $H_2=(1,5...2,5)H_{зд}$ , средний коэффициент трансформации  $\tau_3=0,45$ ;

- зона следа  $L_3=(20...25)H_{зд}$ ,  $H_3=(1,5...2)H_{зд}$ , средний коэффициент трансформации  $\tau_3=0,80$ .

При обтекании ветровым потоком группы зданий необходимо учитывать форму фрагмента застройки, размер и форму расположения разрывов между зданиями, угол расположения фронтальных зданий по отношению к направлению потока. Коэффициент трансформации  $\tau_3$  внутри фрагмента застройки в среднем снижается до 0,3...0,7 и может даже достигать значения 0,1...0,2. Однако, такая ситуация, что зона высоких концентраций ЗВ приходится на внутреннюю часть группы жилых зданий, встречается не часто, за исключением случаев рассеивания от нескольких низких источников выброса (например, дымовых труб котельных).

Поэтому при решении задачи рассеивания ЗВ от высоких точечных источников целесообразно оценить жилую застройку в целом.

При обтекании ветровым потоком жилой застройки (микрорайон, район, населенный пункт) можно выделить четыре основных зоны:

- зона подпора на уровне средней высоты застройки имеет длину  $L_1=(17...20)H_з$ , средний коэффициент трансформации  $\tau_2=0,75$ ;

- зона циркуляции в начале застройки  $L_2=(30...35)H_з$ , средний коэффициент трансформации  $\tau_2=0,85$ ;

- зона циркуляции за застройкой с затененной стороны  $L_3=(20...25)H_з$ , средний коэффициент трансформации  $\tau_2=0,7$ ;

– зона следа  $L_4=(20...35)H_3$ , средний коэффициент трансформации  $\tau_2=0,85$ ; где  $H_3$  – средняя высота застройки.

Таким образом, размеры зоны, в которой происходит трансформация ветрового потока, могут простираются значительно шире границ самой застройки. Например, с наветренной стороны при 5-этажной застройке до 300 метров, с заветренной стороны до 900 метров.

Кроме того, городская застройка оказывает существенное влияние на направление ветрового потока, отклоняя его от первоначального направления за счет образования вертикальных и горизонтальных циркуляционных вихрей внутри застройки. На изменение ветра существенное влияние оказывают

форма застройки, размеры и места расположения разрывов между зданиями, угол атаки ветра по отношению к фронтальной застройке и т.д.

В результате воздействия всех указанных факторов место возникновения зоны с максимальной концентрацией ЗВ может быть смещено на сотни метров от планируемого расчетного места. Для малых и средних городов, имеющих размеры 3–6 км, не учет указанных факторов изменения скорости ветра в условиях реконструкции и размещения новых источников ЗВ может привести к загрязнению атмосферного воздуха и ухудшению экологической обстановки. В таком случае влияние застройки на рассеивание ЗВ однозначно нельзя пренебрегать.

## Литература

1. Безуглая Э.Ю. Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 184 с.
2. Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере. Справочное пособие. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 328 с.
3. Серебровский Ф.Л. Аэрация населенных мест. – М.: Стройиздат, 1985. – 170 с.
4. Реттер Э.И. Архитектурно-строительная аэродинамика. – М.: Стройиздат, – 1984. – 294 с.
5. ГН 2.1.6.1338-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. – М.: Минздрав РФ, 2016. – 15 с.
6. Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе, (МРР – 2017). – М.: Минприроды РФ, 2017. – 80 с.
7. Руководство по оценке и регулированию ветрового режима жилой застройки. – М.: Стройиздат, 1986. – 59 с.

## Reference

1. Bezuglaya E.Yu. Meteorologicheskii potencial i klimaticheskie osobennosti zagryazneniya vozduha gorodov. – L.: Gidrometeoizdat, 1980. – 184 s.
2. Klimaticheskie harakteristiki uslovii rasprostraneniya primesei v atmosfere. Spravochnoe posobie. – L.: Gidrometeoizdat, 1983. – 328 s.
3. Serebrovskii F.L. Aeraciya naseleennykh mest. – M.: Stroiizdat, 1985. – 170s.
4. Retter E.I. Arhitekturno-stroitel'naya aerodinamika. – M.: Stroiizdat, – 1984. – 294 s.
5. GN 2.1.6.1338-03. Predelno dopustimie koncentracii (PDK) zagryaznyayuschih veschestv v atmosfernom vozduhe naseleennykh mest. – M.: Minzdrav RF, 2016. – 15 s.
6. Metodi raschetov rasseivaniya vibrosov vrednih (zagryaznyayuschih) veschestv v atmosfernom vozduhe, (MRR – 2017). – M.: Minprirodi RF, 2017. – 80s.
7. Rukovodstvo po ocenke i regulirovaniyu vetrovogo rejima jiloi zastroiki. – M.: Stroiizdat, 1986. – 59 s.

**Айкашев В. Д.**

доцент, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

**Aikashev V. D.**

docent, South Ural State University, Chelyabinsk

Поступила в редакцию 29.05.2018