

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 692.699.8 : 721

DOI: 10.22227/2305-5502.2022.2.2

Аэрация зданий на сложном рельефе

Дмитрий Анатольевич Ким*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Для изучения аэрационных характеристик района строительства необходимо знать распределение скорости ветра в районе застройки, учет его воздействия на фасады. Важным условием является оценка увеличения теплопотерь здания. Кроме того, само здание, его форма и расположение на местности оказывают значительное влияние на характер воздушного потока. Вблизи здания изменяется скорость и направление ветра, наблюдаются сильные вихревые образования вокруг него в зависимости от формы в плане и объемно-пространственного решения. Также влияет на характер воздушного потока и сама территория застройки с разной планировочной структурой.

Материалы и методы. С целью выявления влияния различного рельефа местности на характер воздушного потока были приняты методы теоретических, натурных исследований аэрации зданий. Проанализированы методики научных исследований отечественных и зарубежных авторов. Определена методология, которая дает возможность прогнозировать аэрационную ситуацию придомовых территорий.

Результаты. Рассмотрены подходы к проблеме оздоровления окружающей среды с точки зрения изучения методов аэродинамических расчетов, используемых в строительной аэродинамике. Обозначена целенаправленная постановка теоретических и экспериментальных исследований, позволяющих разработать эффективную методику расчета естественной аэрации зданий. Установлена интенсивность воздухообмена между внутренней и внешней средой при ветровом напоре, ветровые нагрузки на здания, аэрация помещений, инфильтрационные теплопотери через ограждающие конструкции. Составленная модель формирования циркуляционной зоны при разном размере зданий, скорости ветрового потока и крутизне склона позволяет прогнозировать аэрационный режим придомовых территорий.

Выводы. Предложенный метод расчета можно использовать при прогнозировании аэрационной ситуации придомовых территорий с выявлением зоны ветровой тени в наветренной стороне здания, также возможно определять количество воздуха, протекающего и вытекающего через отверстия противоположных наветренных и наветренных проемов стен зданий при расположении их в наветренной стороне склона гор, аэрацию помещений, ветровых нагрузок на здания, инфильтрационные теплопотери.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: аэрация, здание, склон, рельеф, циркуляционная зона, воздухообмен, аэродинамический коэффициент

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ким Д. А. Аэрация зданий на сложном рельефе // Строительство: наука и образование. 2022. Т. 12. Вып. 2. Ст. 2. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.2.2

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Анатольевич Ким, KimDA@mgsu.ru.

Aeration of buildings on difficult terrains

Dmitry A. Kim*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)
(MGSU); Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. It is necessary to learn the wind speed distribution and its impact on facades to study the aeration characteristics of a built-up area. An important task is to assess an increase in the heat loss from a building. In addition, the building itself, its shape and location have a significant impact on the nature of the air flow. The wind speed and direction change near a building; there is strong eddying around it, depending on the shape in plan and the volumetric-spatial solution. A built-up area, accommodating different layouts of buildings, also affects the nature of the air flow.

Materials and methods. Methods of theoretical, field studies of the aeration of buildings were adopted to identify the influence of different terrains on the nature of air flows. Domestic and foreign methods of scientific research have been analyzed. The methodology that allows predicting the aeration pattern in curtilages has been developed.

Results. Approaches to the problem of improving the environment in terms of studying methods of aerodynamic calculations, used in structural aerodynamics, are considered. The purposeful statement of theoretical and experimental researches, focused on developing an effective method for the calculation of natural aeration of buildings is outlined. The intensity of air exchange between indoor and outdoor environments under the wind pressure, wind loads on buildings, aeration of premises, heat losses from infiltration, or air leakage through enclosing structures were identified. The designed model, simulating the formation of a circulation zone for various dimensions of buildings, wind flow velocities, and slope steepness values allows projecting the aeration in curtilages.

Conclusions. The proposed calculation method can be used to project the aeration in curtilages and identify windless regions on the windward side of a building; it is also possible to identify the amount of air flowing in and out through the opposite windward and windward openings in the walls of buildings when they are located in the windward side of a mountain, the aeration of rooms, wind loads on buildings, and heat losses from infiltration.

KEYWORDS: aeration, building, slope, terrain, circulation zone, air exchange, aerodynamic coefficient

FOR CITATION: Kim D. A. Aeration of buildings on difficult terrains. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2022; 12(2):2. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.2.2

Corresponding author: Dmitry A. Kim, KimDA@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В борьбе за чистоту атмосферы и уменьшение вредных в нее выделений используется естественная энергия ветра, позволяющая осуществлять аэрацию жилых районов. По результатам многолетних измерений скорости и направления ветра, проводимых на метеорологических станциях, оценивается режим ветра в конкретном районе и графически изображается в виде диаграммы розы ветров. Проблемы оздоровления воздушной среды в помещениях и на территории, строительство отдельных высотных зданий и сооружений, а также их комплексов требуют, в частности, знания воздействия на них ветра [1, 2].

Распределение скорости ветра в районе застройки, учет его влияния на фасады здания необходимы для изучения аэрационных характеристик района строительства. При этом важным условием является оценка увеличения теплотерь здания. Кроме того, само здание оказывает значительное влияние на характер воздушного потока. Вблизи здания изменяется скорость и направление ветра, наблюдаются сильные вихревые образования вокруг него в зависимости от формы в плане и объемно-пространственного решения, а также на территории застройки с разной планировочной структурой.

Взаимное расположение зданий и сооружений, их геометрия влияют на распределение скорости ветра. Установление связи между геометрическими параметрами здания и давлением на его фасады, определение скорости и направления ветра в придомовых территориях — одна из основных задач аэродинамики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методы расчета аэродинамической характеристики в зависимости от геометрии здания применяются для отдельно стоящих зданий, расположенных на равнине [3, 4].

Когда здание защищено рядом расположенными строениями, на аэродинамическую характеристику влияет не только его форма, но и геометрия, и взаимное расположение соседних зданий.

Область торможения воздушного потока образуется в заветренной части здания. Границы данной области составляют порядка 6 и более (до 15) высот самого здания и зависят также от скорости ветра, формы и геометрических параметров [5, 6].

В жилых микрорайонах для снижения загрязненности воздуха используется естественная энер-

гия ветра, который улучшает микроклимат помещений зданий и прилегающую территорию, уносит с территории города различные примеси [7]. При изучении аэрации необходимо знать распределение скорости и турбулентность воздушного потока в приземной области района застройки, а также данные по общей картине обтекания зданий и их комплексов ветром. Этот процесс сопровождается возникновением сложной вихревой зоны за зданием и образованием ветрового потока с высокой турбулентностью и большими деформациями полей скоростей вокруг него и над зданием. Воздействие этих явлений на распределение концентраций вредных веществ между зданиями весьма значительно [8, 9].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение влияния геометрических параметров здания на длину циркуляционных зон за зданием (зон ветровой тени) и распределения в них скоростей на моделях жилых зданий в условиях сложного рельефа, имеющих форму прямоугольного параллелепипеда, размеры которых приведены в табл. 1, дало возможность выявить ряд аэродинамических характеристик вокруг здания.

Испытания моделей выполнялись при скорости набегающего воздушного потока $v = 5\text{--}20$ м/с в рабочей части аэродинамической трубы. При этом число Рейнольдса в зависимости от максимальных размеров моделей находилось в пределах $(1,33\text{--}4,14) \cdot 10^6$. Картины обтекания моделей определялись визуально с помощью шелковинок, наклеенных на окрашенную в черный цвет подоснову исследуемых макетов, путем задымления территории из подполья склона местности и фиксации изменения ветрового потока видеокамерой. Количественная оценка аэродинамических характеристик здания исследовалась при помощи установленных на поверхностях фасадов макета зданий трубок Пито.

Результаты проведенных экспериментов позволили сделать следующие предварительные выводы.

1. При взаимодействии ветра со зданием перед ним образуется зона подпора. Часть потока обтекает здание сверху, а часть — с боков. За зданием образуется отрывная зона, состоящая из двух эллиптических вихрей.

2. В циркуляционной зоне распределение скоростей воздушного потока по высоте характеризуется знакопеременной зависимостью, часть воздушного

Табл. 1. Зависимость длины циркуляционной зоны за зданием от его размеров

Номер моделей	Длина S , мм	Ширина B , мм	Высота H , мм	Безразмерный геометрический критерий $Z = \frac{B}{\sqrt{SH}}$	Длина циркуляционной зоны за зданием $X_{\text{ц}}/H$
1	400	100	300	0,29	3,83
2	400	100	200	0,35	4,00
3	400	100	100	0,50	3,75
4	300	100	100	0,60	3,00
5	400	200	100	1,00	2,90
6	400	400	100	2,00	2,75

потока ниже линии нулевых скоростей имеет направление, обратное основному набегающему потоку.

3. На основании изучения качественной картины движения воздушных потоков, возникающих при обтекании ветровым потоком моделей отдельно стоящих зданий, установлено, что образующаяся при срыве потока с наветренной кромки крыши циркуляционная зона может оканчиваться как на поверхности земли за заветренной стеной при $B < 2,5H$, так и на крыше при $B \geq 2,5H$.

4. При $B < 2,5H$ наблюдаются две характерные отрывные области: зона подпора перед зданием и зона аэродинамического следа за зданием (циркуляционная зона), длина которой зависит от геометрических размеров здания. Перед зданием большая часть воздушной струи отклоняется вверх, а часть струи опускается вниз в направлении, обратном основному набегающему потоку. При $B \geq 2,5H$ можно различить зону подпора и циркуляционные зоны за зданием и на уровне крыши. Срыв потока с образованием вихревых зон происходит также с вертикальных кромок стен, при этом возникают торцевые вихревые зоны.

После получения и обработки результатов была установлена зависимость длины ветровой тени здания и отношение длины фасада здания к его высоте S/H (рис. 1). Длина циркуляционной зоны за зданием в зависимости от его геометрии определяется формулой:

$$X_{\text{ц}} = K_{\text{ц}} H (S/B)^{1/2}, \quad (1)$$

где $K_{\text{ц}}$ — коэффициент циркуляции, принимается по табл. 2.

Результаты аэродинамических модельно-экспериментальных исследований зданий позволили установить зависимости размера циркуляционных зон от скорости набегающего ветрового потока, размеров зданий и крутизны склона.

При увеличении количества зданий, обтекаемых ветром, и их расположении на плане оценка степени их защищенности устанавливается в виде взаимного влияния соседних зданий, появления областей ветровой тени и сквозняков с повышенной скоростью [10–13]. В жилой застройке с большим числом зданий, расположенных под различным углом к направлению ветрового потока, скоростной спектр становится сложным. Из-за этого учитывать защищенность каждого здания достаточно трудно. Поэтому при решении задач аэрации осуществляются испытания в аэродинамической трубе моделей целых фрагментов городской застройки, что является трудоемким испытанием в отношении количественной оценки. В этой связи в настоящее время для решения подобных сложных задач при качественной и количественной оценке аэрации сложных форм зданий в плане и объемно-пространственных решений морфозастройки применяется программный комплекс Autodesk CFD, определяющий направления дальнейших исследований [14–17].

Табл. 2. Длина циркуляционной области $X_{\text{ц}}$ и коэффициент циркуляции $K_{\text{ц}}$

Степень наклона поверхности, град	Скорость ветрового воздействия v , м/с	Длина здания, м/ $K_{\text{ц}}$			
		60/ $K_{\text{ц}}$	80/ $K_{\text{ц}}$	100/ $K_{\text{ц}}$	120/ $K_{\text{ц}}$
10	2	4,6H/2,06	4,8H/1,86	5,0H/1,74	5,2H/1,65
	4	5,5H/2,47	5,7H/2,21	5,9H/2,05	6,1H/1,93
	6	6,8H/3,05	6,9H/2,67	7,1H/2,47	7,3H/2,31
30	2	3,5H/1,57	3,6H/1,4	3,8H/1,32	4,0H/1,27
	4	4,2H/1,88	4,3H/1,67	4,5H/1,56	4,6H/1,46
	6	5,3H/2,38	5,1H/2,0	5,5H/1,91	5,6H/1,44

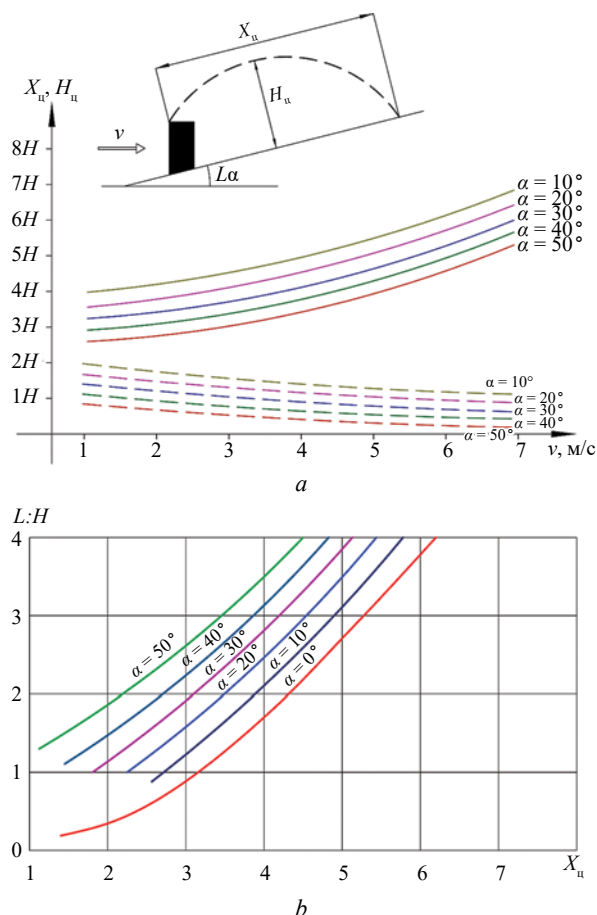


Рис. 1. Модель формирования циркуляционной зоны при перпендикулярном направлении ветра: a — при разной скорости ветрового потока и крутизне склона; b — при разной крутизне склона и размерах здания

Проведенные исследования с целью оценки аэрации зданий и обработка результатов позволили выявить количество притока и оттока воздуха через приточные и вытяжные отверстия, или открытые форточки, или фрамуги светопроемов, расположенные на противоположных фасадах при сквозном проветривании (рис. 2):

- для притока воздуха заветренной фасада:

$$G_1 = \mu_1 v_0 \gamma F_1 \sqrt{(K_1 - K_b)}; \quad (2)$$

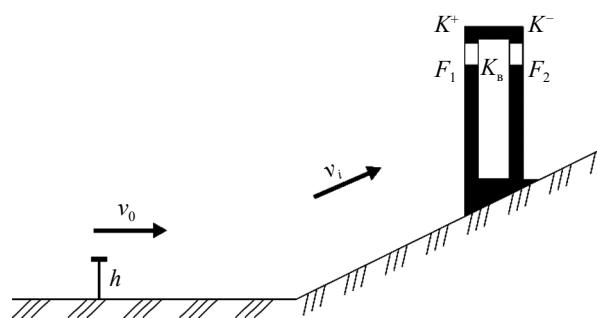


Рис. 2. Схема расположения проемов притока и оттока воздуха в здании

- для оттока воздуха наветренного фасада:

$$G_2 = \mu_2 v_0 \gamma F_2 \sqrt{(K_b - K_2)}, \quad (3)$$

где G_1, G_2 — количество воздуха, протекающего в единицу времени через отверстия 1 и 2; μ_1, μ_2 — коэффициенты расхода; v_0 — скорость воздушного потока (по данным метеорологической станции), м/с; γ — удельный вес воздуха, кг/м³; F_1, F_2 — площади отверстий 1 и 2, м²; K_1, K_2 — аэродинамические коэффициенты для отверстий: 1 — наветренной и 2 — заветренной стороны стены фасадов; K_b — внутренний аэродинамический коэффициент при наличии двух отверстий, определяется по формуле:

$$K_b = \frac{K_1 F_1^2 + K_2 F_2^2}{F_1^2 + F_2^2}. \quad (4)$$

Величина аэродинамического коэффициента в нормативных показателях дается для наветренной (+0,8) и заветренной (−0,4) сторон здания, возводимого на равнине. Крутизна склона, геометрия, форма зданий, их взаимное расположение влияют на данные коэффициенты [18–21].

Изучение изменения скорости воздушного потока вдоль склона холма дало возможность установить следующую зависимость:

$$v_i = v_0 \exp \sqrt{21,16(1 - \bar{x}^2)} \bar{\delta} / \pi, \quad (5)$$

где v_i — скорость воздушного потока над рассматриваемой частью холма, м/с; $\bar{x} = x/L$ — относительная координата; $\bar{\delta} = \delta/L$ — относительная высота; x — расстояние от вершины холма рассматриваемого здания, м; L — 1/2 ширины холма, м; δ — высота возвышенности холма, м.

Подставляя формулу (4) в формулы (2) и (3), получаем расчетные формулы, определяющие количество воздуха, протекающего в единицу времени через отверстия 1 и 2 исследуемого здания на склоне рельефа:

$$G_1 = \mu_1 v_0 \exp \sqrt{21,16(1 - \bar{x}^2)} \bar{\delta} / \pi \cdot \gamma F_1 \sqrt{(K_1 - K_y)}, \quad (6)$$

$$G_2 = \mu_2 v_0 \exp \sqrt{21,16(1 - \bar{x}^2)} \bar{\delta} / \pi \cdot \gamma F_2 \sqrt{(K_y - K_2)}. \quad (7)$$

Расчетные формулы интенсивности притока и оттока воздухообмена через проем отражают воздухообмен между внутренней и внешней средой зданий в зависимости от месторасположения по высоте склона и могут быть использованы при оценке состояния воздушной среды в помещениях проектируемых зданий и кратности воздухообмена помещений. При этом величина кратности воздухообмена рассчитывается по формуле:

$$V_{\pi} = \frac{G_2}{V_{\pi} \gamma_v}, \quad (8)$$

где V_{π} — объем помещения, м³; γ_v — плотность воздуха, кг/м³.

При перпендикулярном направлении движения ветрового потока к главному фасаду здания величину аэродинамических коэффициентов в зависимости от параметров зданий можно определить по следующим формулам (табл. 3).

Подсасывающее действие ветра фиксируется на поверхности торцевых стен, когда направление

ветра перпендикулярно поверхности стены. Модели различных форм имеют средние значения аэродинамических коэффициентов в пределах $-0,34 \dots -0,64$.

Средний аэродинамический коэффициент составляет $+0,5 \dots +0,8$ для продольных наветренных стен зданий всех типов. На высоте $0,2 \dots 0,3H$ в центральной части фасада фиксируется наибольшее давление $+0,62$. У торцевых стен давление падает. На высоте $0,3 \dots 0,4H$ аэродинамический коэффициент равен $+0,37$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Табл. 3. Формулы для вычисления аэродинамических коэффициентов для отдельно стоящих зданий при перпендикулярно направленном ветровом потоке

Формула подсчета при соотношении размеров	Стена здания, обращенная в сторону ветра	
	Продольная	Поперечная
Соотношение размеров стен	Наветренная при $0,18 \leq Z \leq 1,1$	Заветренная при $0,18 \leq Z \leq 1,1$
Расчетные формулы	$K_{90}^{+} = \frac{0,73}{Z_{90}^{+}} + 0,42$	$K_{90}^{-} = \frac{0,045}{Z_{90}^{-}} + 0,344$

Примечание: $Z = \bar{B}/\bar{S}^n$; $\bar{B} = B/H$; $\bar{S} = S/H$; $n = 1/4$; Z — безразмерный геометрический симплекс; $\bar{B}$, $\bar{S}$ — относительная ширина и длина здания; B , H , S — соответственно ширина, высота и длина здания, м.

Настоящий метод расчета позволяет прогнозировать аэрационную ситуацию придомовых территорий с выявлением зоны ветровой тени в заветренной стороне здания и определять количество воздуха, протекающего и вытекающего через отверстия про-

тивоположных наветренных и заветренных проемов стен зданий при расположении их в наветренной стороне склона гор; аэрацию помещений; ветровых нагрузок на здания; инфильтрационные теплопотери.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Умнякова Н.П. Развитие теории расчета и проектирования ограждающих конструкций с учетом специфики внешних воздействий и отражательных свойств материалов : дис. ... д-ра техн. наук. Курск, 2019. 341 с.
2. Гагарин В.Г., Козлов В.В. О комплексном показателе тепловой защиты оболочки здания // АВОК: вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2010. № 4. С. 52–61.
3. Табуничиков Ю.А., Бродач М.М., Шилкин Н.В. Энергоэффективные здания. М. : АВОК-пресс, 2003. 192 с.
4. Гиясов А. Тепло-ветровой режим городского каньона, взаимосвязь его с воздушной средой помещений // Инженерный вестник Дона. 2018. № 1 (48). 144 с.
5. Гиясов Б.И. Роль солнечной радиации в формировании тепло-ветрового режима междомового пространства // Вестник МГСУ. 2012. № 3. С. 12–15.

6. Blázquez T., Suárez R., Sendra J.J. Protocol for assessing energy performance to improve comfort conditions in social housing in a Spanish southern city // International Journal of Energy Production and Management. 2017. Vol. 2. Issue 2. Pp. 140–152. DOI: 10.2495/eq-v2-n2-140-152
7. Cheng Y., Niu J., Gao N. Thermal comfort models: A review and numerical investigation // Building and Environment. 2012. Vol. 47. Pp. 13–22. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.05.011
8. Gıyasov A. Regulation of the microecological environment of residential buildings in southern cities with a hot-calm climate condition // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 193. P. 03036. DOI: 10.1051/mateconf/201819303036
9. Kensek K., Hansanuwat R. Environment control systems for sustainable design: a methodology for testing, simulating and comparing kinetic facade systems // Journal of Creative Sustainable Architecture & Built Environment, CSABE. 2011. Vol. 1. Pp. 27–45.

10. Bacha C.B., Bourbia F. Effect of kinetic facades on energy efficiency in office buildings — hot dry climates // 11th Conference on Advanced Building Skins. Bern, Switzerland, 2016. Pp. 458–468.
11. Горняк Ю.Г. Применение фасадных систем в жилищно-гражданском строительстве // Энергоснабжение. 2003. № 4. С. 28–30.
12. Стецкий С.В., Ходейр В.А. Эффективные солнцезащитные устройства в гражданском строительстве регионов с жарким солнечным климатом // Вестник МГСУ. 2012. № 7. С. 9–15. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.7.9-15
13. Горюхов М.С. Микроклимат жилищ и его гигиеническое нормирование. М. : Медгиз, 1963. 134 с.
14. Giyasov A. The role of the solar irradiation plate for estimation of the insolation regime of urban territories and buildings // Light & Engineering. 2019. Pp. 111–116. DOI: 10.33383/2018-032
15. Rizk A.A., Henze G.P. Improved airflow around multiple rows of buildings in hot arid climates // Energy and Buildings. 2010. Vol. 42. Issue 10. Pp. 1711–1718. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.05.005
16. Кузнецов В.А., Кожевников В.П. Математическая модель свободной конвекции воздуха в комнате // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2008. № 7–8. С. 15–27.
17. Zemitis Ju., Bogdanovics R. Heat recovery efficiency of local decentralized ventilation device at various pressure differences // Magazine of Civil Engineering. 2020. Issue 2 (94). Pp. 120–128. DOI: 10.18720/MCE.94.10
18. Исаев С.И., Кожин И.А., Кофанов В.И., Леонтьев А.И., Миронов Б.М., Никитин В.М. и др. Теория тепломассообмена. 3-е изд. М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 448 с.
19. Прандтль Л. Гидроаэромеханика / пер. с нем. М. : Изд-во иностр. лит., 1951. 575 с.
20. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) : учебник для вузов. М. : Высшая школа, 1982. 415 с.
21. Гиясов А.Г., Гиясов Б.И. Проектирование жилых зданий и ограждающих конструкций в условиях жарко-штилевого климата // Жилищное строительство. 2000. № 6. С. 24–25.

Поступила в редакцию 22 мая 2022 г.

Принята в доработанном виде 30 мая 2022 г.

Одобрена для публикации 30 мая 2022 г.

ОБ АВТОРЕ: Дмитрий Анатольевич Ким — старший преподаватель кафедры архитектурно-строительного проектирования; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0002-9952-2567; KimDA@mgsu.ru.

INTRODUCTION

Natural wind energy is used for the aeration of residential areas in the struggle for the purity of the atmosphere and reduction of harmful emissions. According to the results of long-term measurements of wind velocities and directions, conducted at weather stations, the wind regime in a particular area is evaluated and graphically represented in the form of a wind rose diagram. Problems of improving indoor and outdoor environments, construction of high-rise buildings and structures, as well as their complexes require the awareness of the wind impacts that they are subject to [1, 2].

The distribution of wind velocities in built-up areas, taking into account the wind impact on facades of buildings, is necessary to study the aeration characteristics of built-up areas. Hence, an important factor is an increase in the heat losses from a building. In addition, a building itself has a substantial impact on the nature of air flows. Wind velocity and direction change near a building; there is strong eddying around it, depending on the layout and volumetric-spatial solutions, as well as in a built-up area having buildings with different layouts.

The mutual arrangement of buildings and structures, their geometry affect the distribution of wind velocities. One of the main tasks of aerodynamics is to find out the relationship between geometric parameters of buildings, pressure on facades, wind velocity and direction in courtyards.

MATERIALS AND METHODS

Methods of analyzing the aerodynamic characteristics, depending on the geometry of the building, are applied to freestanding buildings located on the plain [3, 4].

When building is protected by adjacent buildings, its aerodynamic properties are affected not only by its shape, but also the geometry and mutual location of neighbouring buildings.

The slowdown area of the air flow is formed in the windward part of a building. The boundaries of this area are equal to 6 or more (up to 15) height values of the building and also depend on the wind velocity, shape and geometric parameters [5, 6].

In residential neighbourhoods, natural wind energy is employed to reduce the air pollution. Wind energy improves the microclimate on the premises of build-

ings and the surrounding area, carrying various impurities away from the city [7]. When studying aeration, it is necessary to learn the distribution of the velocity and turbulence of air flows in the ground surface area of the built-up neighbourhood, as well as the general data on wind flows around buildings and building complexes. This process is accompanied by the emergence of a complex vortex zone behind the building, the formation of a highly turbulent wind flow, and large deformations of velocity fields around and above the building. The impact of these phenomena on the distribution of concentrations of harmful substances between buildings is very high [8, 9].

RESEARCH RESULTS

The study of the influence of geometric parameters of a building on the length of circulation zones behind this building (windless zones) and the distribution of velocities inside them was undertaken using models of residential buildings on complex terrains, having the shape of a rectangular parallelepiped, the dimensions of which are shown in Table 1. These efforts allowed identifying a number of aerodynamic characteristics around the building.

The models were tested at the velocity of the incoming air flow $v = 5\text{--}20$ m/s in the testing section of the wind tunnel. Notably, the Reynolds number, depending on the maximum dimensions of the models was in the range of $(1.33 - 4.14) \cdot 10^6$. The flowover patterns of the models were identified visually with the help of silk threads glued to the black coloured substrate of the models under study, by smothering the area down the slope and recording the wind flow changes by a video camera. The quantitative assessment of aerodynamic characteristics of the building was investigated by means of Pitot tubes installed on the surfaces of the building model facades.

The following preliminary conclusions can be made on the basis of the results of the experiments.

1. As the wind interacts with the building, a pressure zone emerges in front of the building. Part of the flow

flows around the building from above, and the other part surrounds it from the sides. Behind the building, a tear-off zone is formed, consisting of two elliptical vortices.

2. In the circulation zone, the distribution of airflow velocities over the height is characterized by a sign-variable dependence; a part of the airflow below the zero velocity line has a direction opposite to the main incoming flow.

3. Based on the study of the qualitative pattern of the motion of air flows arising from the wind flow surrounding the model of a freestanding building, it was found that the circulation zone, formed when the flow is blown away from the windward edge of the roof, may terminate both on the ground surface behind the windward wall when $B < 2.5H$, and on the roof when $B \geq 2.5H$.

4. If $B < 2.5H$, there are two characteristic tear-off areas: a pressure zone in front of the building and an aerodynamic trace zone behind the building (circulation zone), the length of which depends on the geometric dimensions of the building. A large part of the air jet is deflected upwards in front of the building and a part of the jet descends in the direction opposite to the main incoming flow. If $B \geq 2.5H$, it is possible to distinguish between a pressure zone and circulation zones behind the building and at the roof level. The flow breakaway, caused by the formation of vortex zones, also occurs on the vertical edges of the walls, and is accompanied by the formation of edge vortex zones.

After obtaining and processing the results, a dependence between the length of the windless zone of the building and the ratio of the length of the building facade to its height S/H was identified (Fig. 1). The length of the circulation zone behind the building, depending on its geometry, is determined by the formula:

$$X_c = K_c H (S/B)^{1/2}, \quad (1)$$

where K_c is the circulation coefficient, taken from Table 2.

The results of the experimental aerodynamic studies of building models identified a dependence between the size of the circulation zones, the wind flow velocity, the size of buildings and the steepness of the slope.

Table 1. Dependence of the length of the circulation zone behind the building on its dimensions

Model number	Length S , mm	Width B , mm	Height H , mm	Dimensionless geometric criterion $Z = \frac{B}{\sqrt{SH}}$	Length of the circulation zone behind the building X_c/H
1	400	100	300	0.29	3.83
2	400	100	200	0.35	4.00
3	400	100	100	0.50	3.75
4	300	100	100	0.60	3.00
5	400	200	100	1.00	2.90
6	400	400	100	2.00	2.75

Table 2. Circulation area length X_c and circulation coefficient K_c

The degree of inclination of the surface, degrees	Speed of the wind impact v , m/s	Building length, m/ K_c			
		60/ K_c	80/ K_c	100/ K_c	120/ K_c
10	2	4.6H/2.06	4.8H/1.86	5.0H/1.74	5.2H/1.65
	4	5.5H/2.47	5.7H/2.21	5.9H/2.05	6.1H/1.93
	6	6.8H/3.05	6.9H/2.67	7.1H/2.47	7.3H/2.31
30	2	3.5H/1.57	3.6H/1.4	3.8H/1.32	4.0H/1.27
	4	4.2H/1.88	4.3H/1.67	4.5H/1.56	4.6H/1.46
	6	5.3H/2.38	5.1H/2.0	5.5H/1.91	5.6H/1.44

Given an increase in the number of buildings streamed by the wind flow and their location on the plan, the assessment of their degree of protection comes as the mutual influence of neighbouring buildings, the appearance of windless areas and high-speed draughts [10–13]. In a residential development with a large number of buildings, located at different angles to the direction of the wind flow, speed spectrum becomes complex. Hence, it is quite difficult to take into account the protection of each building. Therefore, when solving the problems of aeration, wind tunnel tests are conducted using models of whole fragments of urban development, which is a time-consuming test in terms of quantitative assessment. In this regard, Autodesk CFD software package is currently used to solve such complex problems and make qualitative and quantitative assessments of the aeration of complex buildings and volumetric-spatial solutions for built-up areas, which determines the directions of further research [14–17].

Studies, conducted to assess the aeration of buildings and process the results, identified the amount of air inflowing and outflowing through the supply and exhaust openings, or open flaps, or transoms of skylights located on the opposite facades during ventilation (Fig. 2):

- for the air intake of a downwind facade:

$$G_1 = \mu_1 v_0 \gamma F_1 \sqrt{(K_1 - K_a)}; \quad (2)$$

- for the air outflow of the windward facade:

$$G_2 = \mu_2 v_0 \gamma F_2 \sqrt{(K_a - K_2)}; \quad (3)$$

where G_1 , G_2 are amounts of air flowing per unit time through holes 1 and 2; μ_1 , μ_2 are flow coefficients; v_0 is air velocity (according to the weather station), m/s; γ is air specific weight, kg/m³; F_1 , F_2 are areas of holes 1 and 2, m²; K_1 , K_2 are aerodynamic coefficients for holes: 1 — windward side and 2 — downwind side of the facade walls; K_a is the internal aerodynamic coefficient in the presence of two holes, determined by the formula:

$$K_a = \frac{K_1 F_1^2 + K_2 F_2^2}{F_1^2 + F_2^2}. \quad (4)$$

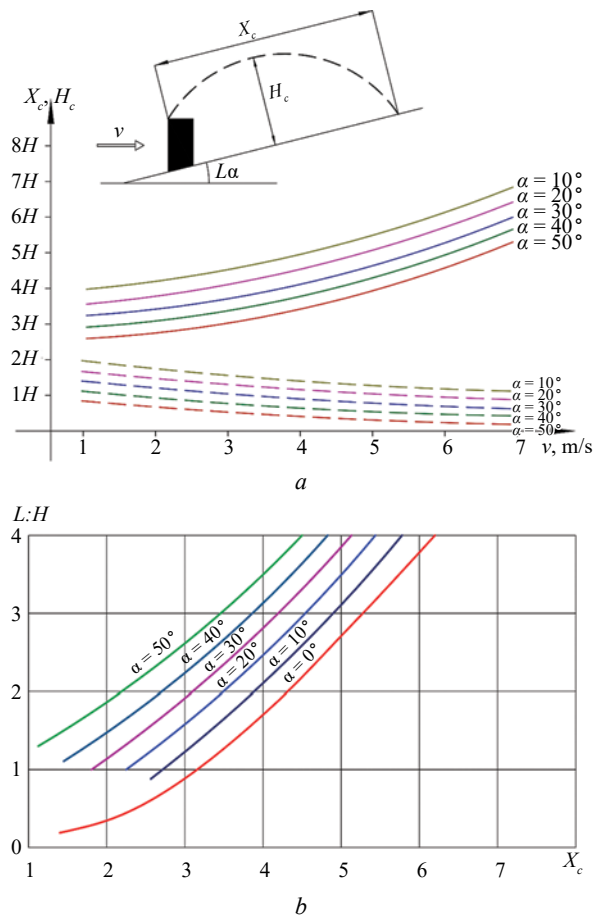


Fig. 1. The circulation zone model for the perpendicular direction of the wind: a — for the wind speed and slope steepness; b — for the slope steepness and building dimensions

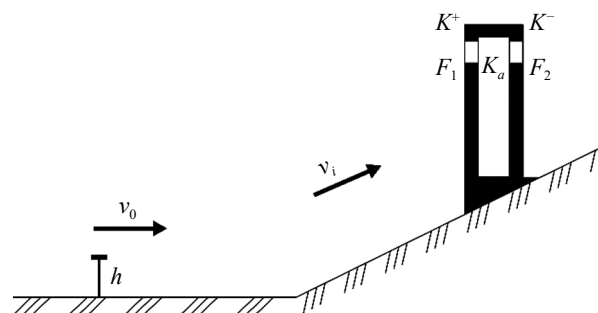


Fig. 2. Layout of air inlet and outlet openings in a building

The value of the aerodynamic coefficient in the adjusted values is given for windward (+0.8) and windward (−0.4) sides of the building erected on the plain. The steepness of the slope, the geometry, the shape of buildings, and their relative location affect these coefficients [18–21].

The study of changes in the velocity of air flows along the hill slope made it possible to establish the following relationship:

$$v_i = v_0 \exp \sqrt{21.16(1 - \bar{x}^2)} \bar{\delta} / \pi, \quad (5)$$

where v_i is airflow velocity over the part of the hill in question, m/s; $\bar{x} = x/L$ is the relative coordinate; $\bar{\delta} = \delta/L$ is relative height; x is a distance from the top of the hill of the building in question, m; L — 1/2 the width of the hill, m; δ is the elevation of the hill, m.

By substituting formula (4) into formulas (2) and (3), we obtain calculation formulas determining the amount of air flowing per unit time through openings 1 and 2 of the building under study on the slope:

$$G_1 = \mu_1 v_0 \exp \sqrt{21.16(1 - \bar{x}^2)} \bar{\delta} / \pi \cdot \gamma F_1 \sqrt{(K_1 - K_y)}, \quad (6)$$

$$G_2 = \mu_2 v_0 \exp \sqrt{21.16(1 - \bar{x}^2)} \bar{\delta} / \pi \cdot \gamma F_2 \sqrt{(K_y - K_2)}. \quad (7)$$

Calculation formulas used to find the intensity of the air inflow and outflow through the openings demonstrate the air exchange between the internal and external environment of buildings depending on the location of the slope; they can be used to evaluate the condition of the indoor air environment of the designed buildings and the air exchange rate. In this case, the air exchange rate is calculated using the following formula:

$$v_r = \frac{G_2}{V_r \gamma_a}, \quad (8)$$

where V_r is volume of the room, m³; γ_a is air density, kg/m³.

At a perpendicular direction of the wind flow to the main facade of the building the value of aerodynamic coefficients, depending on the parameters of buildings can be determined by the following formulas (Table 3).

The suction effect of wind is registered on the surface of the end walls when the wind direction is perpendicular to the wall surface. Models of different shapes have mean values of aerodynamic coefficients between −0.34...−0.64.

The average aerodynamic coefficient is +0.5...+0.8 for longitudinal windward walls of all types of buildings. At a height of 0.2...0.3H in the central part of the facade, the highest pressure of +0.62 is recorded.

Table 3. Formulas for the calculation of aerodynamic coefficients for freestanding buildings in case of a perpendicular wind flow

Calculation formula for the dimension ratio	The wall of the building facing the wind	
	Longitudinal	Transverse
Wall dimension ratio	Windward at $0.18 \leq Z \leq 1.1$	Downwind at $0.18 \leq Z \leq 1.1$
Calculation formulas	$K_{90}^+ = \frac{0.73}{Z_{90}^+} + 0.42$	$K_{90}^- = \frac{0.045}{Z_{90}^-} + 0.344$

Note: $Z = \bar{B}/\bar{S}^n$; $\bar{B} = B/H$; $\bar{S} = S/H$; $n = 1/4$; Z is a dimensionless geometric simplex; $\bar{B}$, $\bar{S}$ are the relative width and length of the building; B , H , S are the width, height and length of the building, in meters.

ed. At the end walls the pressure drops. At a height of 0.3...0.4H the aerodynamic coefficient is +0.37.

CONCLUSION AND DISCUSSION

The proposed calculation method makes it possible to predict the aeration situation in adjacent areas

by identifying the windless zone on the windward side of a building and to determine the amount of air flowing in and out through the openings in the opposite windward and windward walls of buildings when they are located on the windward side of a mountain slope; aeration of rooms; wind loads on buildings; heat losses due to infiltration.

REFERENCES

1. Umnyakova N.P. *Development of the theory of calculation and design of enclosing structures, taking into account the specifics of external influences and the reflective properties of materials : dissertation ... doctor of technical sciences.* Kursk, 2019; 341. (rus.).

2. Gagarin V.G., Kozlov V.V. On the complex indicator of thermal protection of the building envelope. *AVOK: Ventilation, heating, air conditioning, heat supply and construction thermal physics*. 2010; 4:52-61. (rus.).
3. Tabunshchikov Yu.A., Brodach M.M., Shilkin N.V. *Energy efficient buildings*. Moscow, AVOK-press, 2003; 192. (rus.).
4. Giyasov A. Heat-wind regime of the urban canyon, its relationship with the air environment of the premises. *Engineering Journal of Don*. 2018; 1(48):144. (rus.).
5. Giyasov B.I. Role of solar radiation in formation of thermal and wind conditions of the InterBuilding Space. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2012; 3:12-15. (rus.).
6. Blázquez T., Suárez R., Sendra J.J. Protocol for assessing energy performance to improve comfort conditions in social housing in a Spanish southern city. *International Journal of Energy Production and Management*. 2017; 2(2):140-152. DOI: 10.2495/eq-v2-n2-140-152
7. Cheng Y., Niu J., Gao N. Thermal comfort models: A review and numerical investigation. *Building and Environment*. 2012; 47:13-22. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.05.011
8. Giyasov A. Regulation of the microecological environment of residential buildings in southern cities with a hot-calm climate condition. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 193:03036. DOI: 10.1051/mateconf/201819303036
9. Kensek K., Hansanuwat R. Environment control systems for sustainable design: A methodology for testing, simulating and comparing kinetic facade systems. *Journal of Creative Sustainable Architecture & Built Environment, CSABE*. 2011; 1:27-45.
10. Bacha C.B., Bourbia F. Effect of kinetic facades on energy efficiency in office buildings — hot dry climates. *11th Conference on Advanced Building Skins*. Bern, Switzerland, 2016; 458-468.
11. Gorniak Yu.G. The use of facade systems in housing and civil construction. *Energoberezhenie*. 2003; 4:28-30. (rus.).
12. Stetskiy S.V., Khodeir W.A. Effective sun protection devices in the civil engineering of hot and sunny regions. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2012; 7:9-15. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.7.9-15 (rus.).
13. Goromosov M.S. *Microclimate of dwellings and its hygienic regulation*. Moscow, Medgiz Publ., 1963; 134. (rus.).
14. Giyasov A. The Role of the Solar Irradiation Plate for Estimation of the Insolation Regime of Urban Territories and Buildings. *Light & Engineering*. 2019; 111-116. DOI: 10.33383/2018-032
15. Rizk A.A., Henze G.P. Improved airflow around multiple rows of buildings in hot arid climates. *Energy and Buildings*. 2010; 42(10):1711-1718. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.05.005
16. Kuznetsov V.A., Kozhevnikov V.P. Mathematical model of free convection of air in a room. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Problems of Energy*. 2008; 7-8:15-27. (rus.).
17. Zemitis Ju., Bogdanovics R. Heat recovery efficiency of local decentralized ventilation device at various pressure differences. *Magazine of Civil Engineering*. 2020; 2(94):120-128. DOI: 10.18720/MCE.94.10
18. Isaev S., Kozhinov I., Kofanov V., Leonatiev A.I., Mironov B.M., Nikitin V.M. et al. *Theory of heat and mass transfer (3rd edition)*. Moscow, MSTU named after N.E. Bauman, 2017; 448. (rus.).
19. Prandtl L. *Hydroaeromechanics*. Moscow, Publishing House of Foreign Literature, 1951; 575. (rus.).
20. Bogoslovsky V.N. *Building thermal physics*. Moscow, Higher school Publ., 1982; 415. (rus.).
21. Giyasov A.G., Giyasov B.I. Design of residential buildings and enclosing structures in a hot and calm climate. *Housing Construction*. 2000; 6:24-25. (rus.).

Received May 22, 2022.

Adopted in revised form on May 30, 2022.

Approved for publication on May 30, 2022.

B I O N O T E S: **Dmitry A. Kim** — senior lecturer of the Department of Architectural and Construction Design; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9952-2567; KimDA@mgsu.ru.