

ОСОБЕННОСТИ ВЕТРОВОГО РЕЖИМА ТИПОВЫХ ФОРМ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

М.С. Мягков

Московский архитектурный институт (государственная академия), Москва, Россия

Л.И. Алексеева

Московский Государственный Университет, Москва, Россия

Аннотация

Регулирование ветрового режима является важнейшей архитектурно-климатической задачей, решаемой на градостроительном уровне. Возможность создания благоприятных условий аэрации, влияющей на биоклиматическую комфортность, условия рассеивания загрязняющих веществ и естественную вентиляцию зданий зависит от ветрового климата района строительства и планировочного решения застройки. В статье представлены результаты анализа воздействия трех условных типов застройки – «город-чаша», «город-холм» и «город-равнина» – на поле ветра в ветровых, умеренно-ветровых и штилевых условиях.

Сравнительный анализ статистических параметров полей скорости ветра, полученных путем математического моделирования, позволил выявить наиболее оптимальные градостроительные решения для различных ветровых климатов. Сделанные выводы дают возможность градостроителям и архитекторам в первом приближении оценить проектное решение с позиции необходимости и достаточности климатозащитных функций городской застройки.

Ключевые слова: архитектурно-климатический анализ, планировка и застройка, ветровой режим, моделирование микроклимата, ENVI-met

WIND PATTERN FEATURES IN TYPICAL CITY MODELS

M. Myagkov

Moscow Institute of Architecture (State Academy), Moscow, Russia

L. Alekseeva

Moscow State University, Moscow, Russia

Abstract

Wind conditions in urban environments are important for a number of reasons. Outdoor aeration, interior natural ventilation, bioclimatic comfort and air pollutants dispersion are most important. That is why basic city morphology options should be found yet at the urban planning stage with consideration of local wind climate. This paper is intended for establishing a range of urban planning decisions, based on the three typical city models – «city-cup», «city-hill» and «city-plateau» - affecting urban wind climate under high, moderate and low wind velocity conditions. These three case studies illustrate the possibilities and limitations of applying urban wind climate control measures to improve living conditions.

To validate typical models in different wind climates simulations with the use of ENVI-met software suite were carried out. Comparison of derived wind field statistics allows to reveal the optimal town-planning decisions for various wind climates. The knowledge obtained from this analysis provides planners and architects a way to consider wind protection options that should be applied in climate-conscious design.

Keywords: climate-sensitive design; town planning; wind conditions; numerical simulation of microclimate; ENVI-met software

В современной России стало распространенной тенденцией привлекать к проектной подготовке всех этапов строительства (от генплана города до ПС частного коттеджа) иностранные фирмы, ранее никогда не работавшие в природно-климатических условиях России, отличающейся большей (по сравнению с Европой и США) выраженностью сезонов, суровостью зим и летними волнами жары. В таких условиях слепое копирование образцов международного стиля, пусть даже самых удачных, может привести к серьезным градостроительным ошибкам. Поэтому каждый раз, приступая к архитектурному и градостроительному проектированию, необходимо со всей внимательностью изучить природно-климатические условия района строительства, выявить основные неблагоприятные факторы, разработать перечень мероприятий по оптимизации микроклимата архитектурно-градостроительной среды, определить приоритет и порядок их применения. Какие-то задачи потребуются решать на градостроительном уровне, другие можно перенести на процесс архитектурного проектирования [1, 2].

К числу архитектурно-климатических задач, вытекающих из природно-климатических условий России и решаемых на градостроительном уровне, прежде всего, относится задача регулирования ветрового режима. Для ветровых районов это – защита городской территории от избыточных ветровых нагрузок и связанных с ними теплопотерь зданий и холодового стресса в холодное время года. В штилевых районах решение этой задачи должно быть направлено на максимальное сохранение аэрационного потенциала застройки и обеспечение естественной вентиляции внутренней и внешней среды зданий и биоклиматической комфортности территории застройки, особенно в теплое время года.

С целью выявления оптимальных планировочных градостроительных решений для районов с различным ветровым климатом (штилевой, умеренной, ветровой) было выполнено исследование ветрового режима типовых приемов застройки. Решение поставленной задачи произведено путем математического моделирования вынужденной (динамической) и индуцированной термической конвекции в трёх условных (упрощенных) архитектурно-градостроительных ландшафтах, имеющих характерные горизонтальные сечения («skyline») (Рис. 1(a-c)).

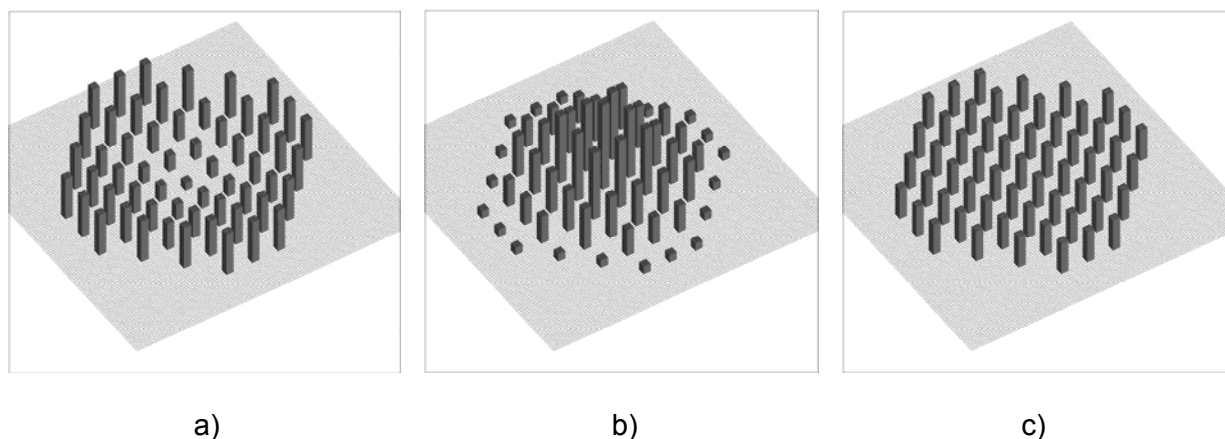


Рис. 1(a-c). Общий вид моделируемых типов застройки: а) «город-чаша»; б) «город-холм»; в) «город-равнина»

Первый тип: малоэтажная центральная часть застройки с увеличением высоты зданий к периферии – «город-чаша» (Рис. 1а). К городам этого типа относятся, как правило, современные, расположенные на спокойном рельефе города с небольшим по площади охраняемым историческим архитектурным ландшафтом в центральной части и развитой многоэтажной периферией. К этому же типу относятся многие древние города, от средних до крупных (по принятой классификации [1]), с преимущественно средне- и малоэтажной

застройкой, расположенные в пониженных формах рельефа - Душанбе, Бишкек, Иерусалим и т.д.



Рис. 2. «Город-чаша» Душанбе (фото с сайта <https://elordenmundial.wordpress.com>)

Второй тип: высотная центральная часть застройки с низкими зданиями по периферии – «город-холм» (Рис. 1b). Города этого типа характерны для США, Канады и ряда других постиндустриальных стран. В центральной части этих городов, где стоимость земли наиболее высока, расположены высотные здания коммерческо-делового и административного назначения, далее к периферии идёт много- и среднеэтажная застройка смешанного назначения, а крайняя периферия и пригороды заняты малоэтажной индивидуальной жилой застройкой с большой долей озеленения. Это, как правило, современные большие и крупные города, не имеющие исторической части.



Рис. 3. «Город-холм» Окленд, Новая Зеландия (фото с сайта <http://wallbox.ru>)

Третий тип: все здания в застройке примерно одинаковой высоты – «город-равнина» (Рис. 1с). Этот тип застройки широко распространен среди современных и позднесредневековых городов, расположенных на относительно спокойном рельефе, имеющих большой по площади охраняемый архитектурный ландшафт в центральной части и регулирующую по высотности застройку периферии. К числу таких городов относятся многие столицы европейских стран. В России примером такого города может служить Санкт-Петербург.



Рис. 4. Париж – типичный «город-равнина» (фото с сайта <http://wallbox.ru>)

Математическое моделирование ветрового режима в городской застройке выполнялось с использованием программного комплекса ENVI-met v. 3.1, включающего вихреразрешающую негидростатическую аэродинамическую модель, описывающую физические процессы мезо- и микромасштабной циркуляции воздуха с учетом его молекулярного и радиационного теплообмена со зданиями и подстилающей поверхностью. Кроме того, в модель включен расчетный модуль, учитывающий влияние инсоляции на тепловой баланс территории и зданий, попадающих в моделируемую область, и дополнительные встроенные расчетные модули, учитывающие влияние растительности и теплофизических характеристик зданий и сооружений на вынужденную (динамическую) и индуцированную городской застройкой термическую конвекцию.

Указанные особенности отличают использованную модель от других т.н. CFD¹ моделей, применяющихся в строительстве и архитектуре и описывающих только вынужденную конвекцию и турбулентность, возникающие при обтекании препятствий. Без учета этих механизмов моделируемые микроклиматические параметры городской среды часто существенно отличаются от результатов инструментальных наблюдений [4]. Программная реализация математического аппарата модели ENVI-met, основанного на конечно-разностной схеме решения уравнений Навье-Стокса, выполнена специалистами Географического института Рурского университета (г. Бошум, Германия) [5].

Способность застройки за счет своей структуры модифицировать поле ветра оценивалась путем моделирования деформации воздушного потока (динамической конвекции). Всего было выполнено 6 вариантов численного моделирования аэродинамической ситуации – для каждого из трех вариантов застройки рассчитывались поля скоростей ветра при двух его направлениях: параллельно линиям застройки и под углом 45° к ним. Номера вариантов расчетов для ветра, параллельного застройке – 1.1, 2.1, 3.1 (первая цифра варианта расчета означает номер варианта застройки), для ветра, дующего под углом 45° к линиям застройки – 1.2, 2.2 и 3.2.

Для обеспечения сопоставимости результатов моделирования все виды застройки были сформированы из одинакового количества зданий (57) с прямоугольным планом размером 12×12 м высотой от 10 до 50 м и имеющим одинаковый суммарный строительный объем (2130 м³). Во всех вариантах размеры моделируемой территории застройки составляют 360×360 м, количество узлов расчетной сетки – 14641. Результаты некоторых вариантов расчета представлены на Рис. 5 - 7.

На Рис. 5(а-с) и Рис. 6(а-с) представлена графическая интерпретация результатов расчетов в виде вертикального сечения поля скорости ветра по линии его потока,

¹ computational fluid dynamic

секущей центральную линию застройки вдоль потока и перпендикулярно к нему. Выводы, которые можно сделать путем качественного анализа этих изображений, касаются пространственного распределения направлений и скорости ветра в различных типах застройки. Из Рис. 5(а-с) и Рис. 6(а-с) видно, что застройка, работая как единый массив, снижает среднюю скорость ветрового потока до 30-40% от фоновой уже на высоте $\frac{3}{4}$ от средней высоты зданий. Это снижение находится примерно на одинаковом уровне по всему треку воздушного потока через массив застройки (Рис. 5(а-с)). Есть очевидные различия в скорости ветра в верхней части застройки и над ней, о которых здесь мы не будем говорить, поскольку они повторяют общие закономерности обтекания воздушным потоком отдельного препятствия, достаточно хорошо изученные (см., например, И.Э. Реттер «Архитектурно-строительная аэродинамика»; Серебровский Ф.Л. «Аэрация жилой застройки» и др.).

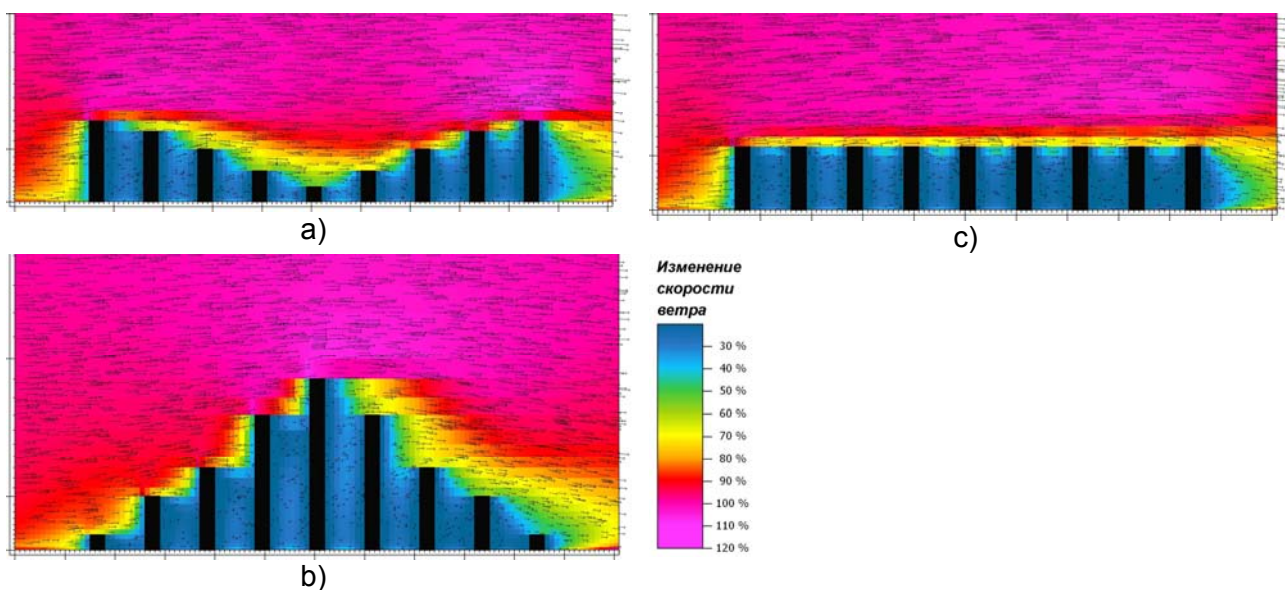


Рис. 5 (а-с). Вертикальный разрез поля скорости ветра (продольный) при динамической конвекции: а) «город-чаша»; б) «город-холм»; с) «город-равнина»

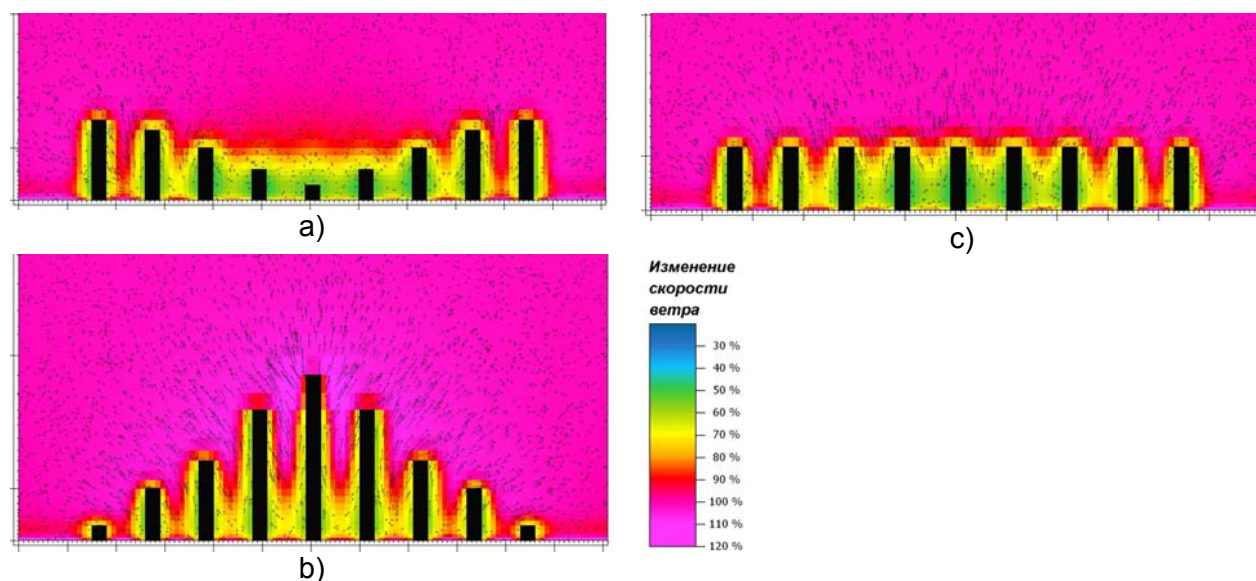


Рис. 6 (а-с). Вертикальный разрез поля скорости ветра (поперечный) при динамической конвекции: а) «город-чаша»; б) «город-холм»; с) «город-равнина»

Однако проявляются и некоторые закономерности, характерные для воздухопроницаемой среды. Во-первых, это – увеличение скорости ветра в приземном (до 2-4 м) слое, связанное с рассечением потока отдельными препятствиями (зданиями). Это говорит о том, что даже внутри плотной городской застройки вокруг каждого здания создается собственный микроциркуляционный механизм, который приводит к усилению ветра в приземном слое вблизи габаритов здания. Он может вызывать дискомфортное ветровое воздействие на человека, находящегося в непосредственной близости от него, даже если это здание находится в центральной части города. Особенно ярко эта закономерность проявляется в контрастной по высоте застройке – «город-чаша», «город-холм» (Рис. 5а,б). Это обстоятельство требует учета при принятии объемно-планировочного решения зданий высотой более 40 м для обеспечения ветровой комфортности и безопасности в соответствии с требованиями ст. 30 «Технического регламента о безопасности зданий и сооружений» (№ 384-ФЗ от 31.12.09). На территории Москвы с 2005 года действует аналогичное требование относительно высотных зданий-комплексов и прилегающей к ним территории [6]. Наиболее равномерный ветровой режим в приземном слое воздуха формируется при застройке города зданиями одинаковой этажности – «город-равнина» (Рис. 5с). Ветрозащитные свойства этой застройки были эмпирически установлены и начали применяться ещё в Древнем Египте и другими ранними городскими культурами [7, 8 и др.].

Во-вторых, в разрывах между зданиями, образующими проницаемый ветром фронт, могут наблюдаться участки, где скорость ветра не ниже, а иногда и значительно выше скорости набегающего воздушного потока (Рис. 6(а-с)). Это проявление известного в городской климатологии эффекта «ветрового каньона» [9, 10], когда ветер усиливается при движении воздуха вдоль городских магистралей, имеющих сплошной фронт первого эшелона застройки. Особенно заметное усиление ветра в таких «каньонах» происходит в приземном слое воздуха, независимо от этажности зданий, его образующих (контрастная, одинаковой этажности). На необходимость борьбы с этими «ветровыми каньонами» в Москве территориальными строительными нормами введен ряд градостроительных требований [6].

На Рис. 7(а-с) поверхности разного цвета обозначают положение в пространстве совокупности точек с одинаковыми скоростями ветра (в % от скорости фонового ветра). Из этих рисунков видно, что максимального развития динамическая конвекция достигает в пограничном слое атмосферного воздуха подветренной части застройки. Здесь наблюдаются наибольшие по объему и скорости области возмущения воздушного потока, особенно это заметно для застройки типа «город-чаша» и «город-равнина» (Рис. 7а,с соответственно). Увеличение абсолютной и вертикальной скорости ветра с подветренной стороны улучшает условия его горизонтального и вертикального перемешивания, таким образом, создаются максимально благоприятные условия для рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере. Это ещё одна причина, по которой размещение промышленных и иных объектов, являющихся источниками химического загрязнения атмосферы, целесообразно располагать именно с подветренной стороны городов, как этого требует п. 14. 9 СП «Градостроительство» [3].

Количественный анализ воздействия застройки на воздушный поток выполнялся путем сравнения статистических характеристик полей ветра, полученных в результате математического моделирования динамической конвекции. Статистические параметры полей ветра для различных вариантов модельных расчетов приведены в Таблице 1. В ней представлены следующие основные характеристики поля ветра на высоте 2 м, влияющие на ветровой комфорт и экологическое состояние приземного слоя воздуха: минимальная, максимальная и средняя скорости ветра и C_v – коэффициент вариации значений скорости ветра в узлах расчетного прямоугольника. C_v характеризует контрастность поля ветра и величину ее горизонтальных градиентов. Чем выше значение C_v , тем более неравномерным и, следовательно, менее комфортным является ветровая ситуация на территории застройки. С другой стороны, контрастность поля ветра создает более благоприятные условия для естественной вентиляции зданий, поэтому в районах с

низким ветровым фоном высокие значения этого коэффициента являются благоприятным фактором.

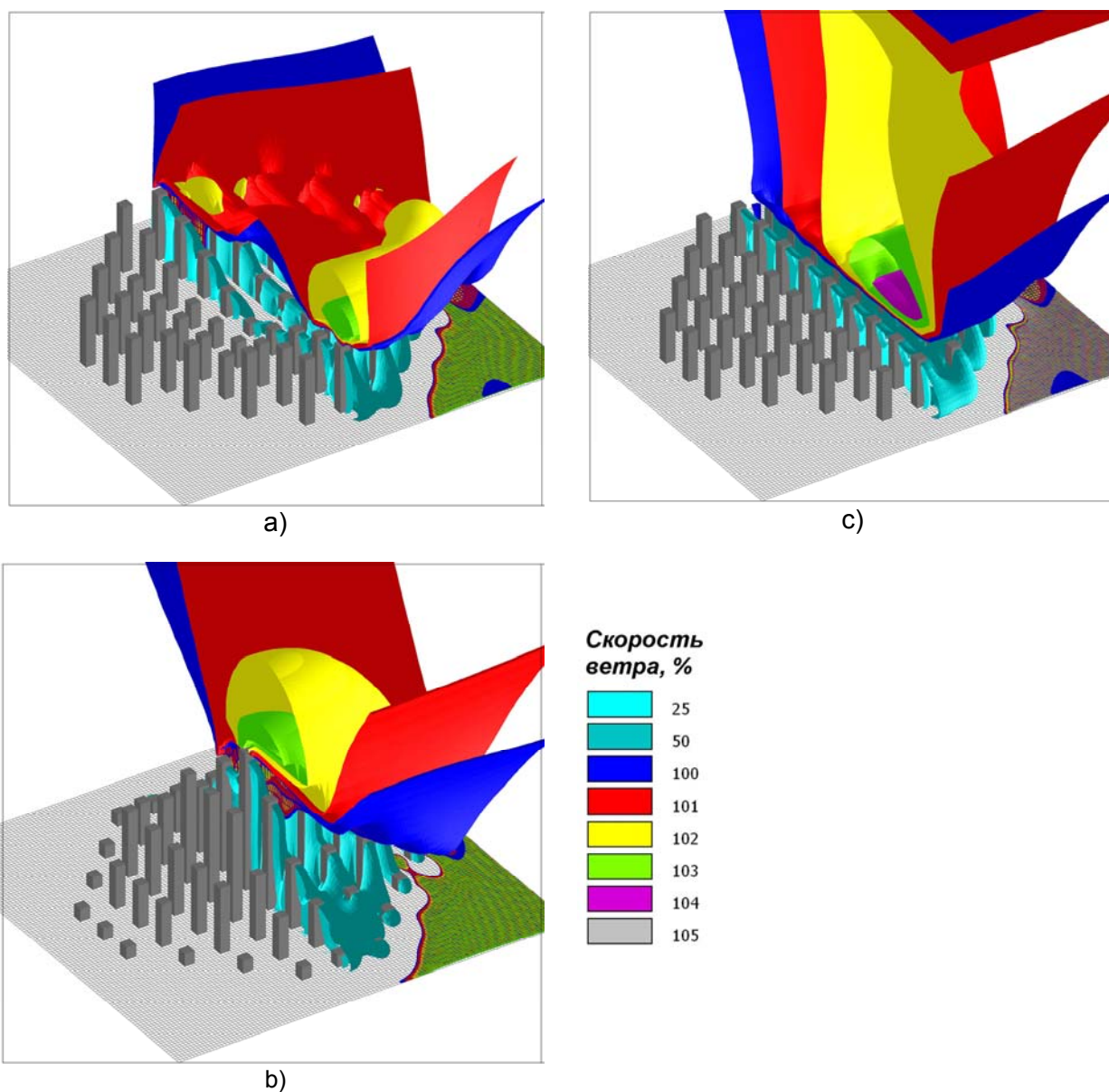


Рис. 7 (а-с). Пространственная структура отклонений скоростей ветра при динамической конвекции: а) «город-чаша»; б) «город-холм»; с) «город-равнина»

Таблица 1. Статистические параметры полей скорости ветра (динамическая конвекция) на высоте 2 м

Параметр	Вариант расчета					
	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2
$V_{\min}$ (м/с)	0.09	0.27	0.06	0.14	0.08	0.23
$V_{\max}$ (м/с)	4.08	4.82	3.91	4.06	3.96	4.62
$V_{\text{средн}}$ (м/с)	2.53	2.31	2.77	2.37	2.47	2.24
C_v	0.35	0.38	0.33	0.36	0.37	0.39

По результатам сравнения статистических параметров полей ветра для различных вариантов расчета была выполнена рейтинговая оценка приемов застройки по степени ее благоприятности для различных ветровых зон. Основные статистические параметры принимались в качестве критериев оценки, а оценка от 1 до 6 (по количеству вариантов) присваивалась по следующему принципу: 1 – наиболее низкое значение параметра в случае признания его как положительного фактора, 6 – наиболее высокое значение этого параметра.

Критерии оценки параметров для различных районов принимались по ниже представленному принципу.

Для штилевых районов:

- высокая минимальная скорость ветра – положительный фактор,
- высокая максимальная скорость ветра – положительный фактор,
- высокая средняя скорость ветра – положительный фактор,
- высокий коэффициент вариации – положительный фактор.

Для районов с умеренными ветрами:

- высокая минимальная скорость ветра – положительный фактор,
- высокая максимальная скорость ветра – отрицательный фактор,
- высокая средняя скорость ветра – положительный фактор,
- высокий коэффициент вариации – отрицательный фактор.

Для ветровых районов:

- высокая минимальная скорость ветра – отрицательный фактор,
- высокая максимальная скорость ветра – отрицательный фактор,
- высокая средняя скорость ветра – отрицательный фактор,
- высокий коэффициент вариации – отрицательный фактор.

Далее выполнялось суммирование баллов для каждого варианта застройки, и по ним производилась рейтинговая оценка различных приемов застройки для разных ветровых районов. Соответственно, чем меньше оказывалась общая сумма баллов для какого-либо варианта застройки, тем выше принимался его рейтинг для того или иного ветрового района. Результаты балльной оценки статистических параметров полей ветра и рейтинговой оценки вариантов застройки приведены в Таблице 2.

Анализируя полученные результаты с позиции обеспечения ветровой комфортности городской застройки в целом, а не для отдельных групп зданий, можно сделать следующие выводы.

Для районов с низкими фоновыми скоростями ветра предпочтительным является архитектурный ландшафт «города-чаши», где более высокие здания располагаются по периферии города, а центральная часть занята малоэтажной застройкой. Наименее благоприятным вариантом является «город-холм» с высотной центральной частью и малоэтажной периферией.

Для районов с умеренными скоростями ветра варианты «город-чаша» и «город-холм» являются более благоприятными, чем «город-равнина», состоящий из зданий одинаковой этажности на всей территории застройки.

Таблица 2. Рейтинговая оценка приемов застройки по ветровому режиму (динамическая конвекция)

Ветровой район	Вариант расчета	Фактор				Сумма баллов	Место в рейтинге
		$V_{\min}$	$V_{\max}$	$V_{\text{средн}}$	C_v		
Штилевой район	1.1	4	3	3	2	20	1
	1.2	1	1	1	5		
	2.1	6	6	6	1	34	3
	2.2	3	4	4	4		
	3.1	5	5	5	3	30	2
	3.2	2	2	2	6		
Умеренно-ветровой район	1.1	4	4	3	2	26	1
	1.2	1	6	1	5		
	2.1	6	1	6	1	27	2
	2.2	3	3	4	3		
	3.1	5	2	5	4	31	3
	3.2	2	5	2	6		
Ветровой район	1.1	3	4	4	2	36	3
	1.2	6	6	6	5		
	2.1	1	1	1	1	17	1
	2.2	4	3	3	3		
	3.1	2	2	2	4	31	2
	3.2	5	5	5	6		

Для ветровых районов (в том числе для прибрежных территорий) наиболее благоприятные условия аэрации и ветровой комфортности обеспечиваются вариантом «город-холм». При этом территория застройки характеризуется наиболее комфортными ветровыми условиями – низкими максимальными скоростями и горизонтальными градиентами скорости в приземном слое. Ветрозащита требуется только для верхних этажей высотной части застройки. Наименее благоприятным вариантом, несмотря на устоявшееся мнение о его пользе для улучшения микроклимата является «город-чаша», где высотная застройка размещается по периферии. Как видно из Рис. 5а, 6а, 7а, ветрозащитные функции высотных зданий обеспечивают комфортность в локальных масштабах по периферии города. В центральной части города возмущения воздушных потоков, создаваемые этими зданиями, значительно снижают уровень ветровой комфортности и в целом территория города имеет наименее благоприятный ветровой режим из всех рассмотренных вариантов застройки.

Ещё одной важной характеристикой условий аэрации городской застройки в условиях умеренного и штилевого ветрового климата является мощность термической конвекции, возникающей за счет положительной аномалии теплового баланса городской среды. В поле температуры эта аномалия приводит к формированию известного мезоклиматического эффекта «городской остров тепла». К основным причинам формирования этой аномалии в умеренном климате относятся увеличение доли поглощенной солнечной радиации за счет снижения альбедо городской застройки и недорасход тепла на испарение атмосферных осадков по сравнению с естественными условиями [2]. В зимнее время к этим причинам присоединяется выделение техногенного тепла в приземный слой атмосферы. В результате совместного действия этих причин

воздух в городе нагревается больше, чем на прилегающей к нему незастроенной территории, и начинает формироваться термическая конвекция, стимулирующая воздухообмен между городом и пригородами (т.н. «городской бриз»), а также между приземным слоем и вышележащими слоями атмосферного воздуха, не испытывающими теплового воздействия городской застройки. За счет этого на фоне штилевых погодных условий на территории города возникают воздушные потоки с достаточно заметными скоростями. В штилевых районах эта конвекция часто является единственным механизмом перемешивания воздуха, позволяющим замещать загрязненный перегретый воздух из приземного слоя атмосферы городской застройки на чистый свежий воздух из пригородных зон и вышележащих слоев атмосферы.

Для сравнения интенсивности термической конвекции, создаваемой рассматриваемыми морфотипами застройки, был выполнен дополнительный расчет, в котором в качестве начального и граничного условия принималась нулевая скорость ветра. Расчет выполнен для безоблачной погоды в околополуденные часы на дату летнего солнцестояния, т.е. время максимальной инсоляции в средних широтах (в расчете застройка размещалась на широте и долготе города Москвы). Для оценки интенсивности термической конвекции принимались те же критерии, что и для оценки динамической конвекции, за исключением критерия максимальной скорости ветра, которая является благоприятным фактором в любом случае. Вместо максимальной скорости ветра был добавлен критерий средней вертикальной скорости ветра на высоте 10 м (V_{Zcp10}). Именно этим параметром характеризуется интенсивность вертикального перемешивания приземного воздуха, улучшающего экологические и биоклиматические параметры городской застройки. Расчетные значения остальных параметров поля скорости ветра также принимались для относительной высоты 10 м, а не 2 м., как в предыдущих сериях расчетов. Номера вариантов расчетов для штилевых условий – 1.3, 2.3, 3.3 (первая цифра варианта расчета – номер варианта застройки).

Таблица 3. Статистические параметры полей скорости ветра (термическая конвекция) на высоте 10 м

Параметр	Вариант расчета		
	1.3	2.3	3.3
V_{max10} (м/с)	2.32	1.76	2.28
$V_{средн10}$ (м/с)	1.02	0.96	0.99
V_{Zcp10} (м/с)	0.20	0.18	0.18
C_{v10}	0.56	0.41	0.54

Результаты расчетов полей ветра при термической конвекции представлены на Рис. 8 (а-с), 9 (а-с). Из этих рисунков видно, что «факел» теплого воздуха, поднимающийся над моделируемым городом, имеет хорошо выраженную асимметрию – сдвиг к северу по меридиану относительно центра застройки. Это, очевидно, связано с тем, что наибольшей интенсивности термическая конвекция достигает вблизи максимального теплофизического контраста подстилающей поверхности, т.е. на границе застроенной территории и свободной от застройки озелененной территории, расположенной к северу от нее. В вариантах «город-чаша» и «город-холм» этот контраст усиливается за счет самой формы застройки. При различиях в характере застройки разных частей города максимальные потоки тепла в приземный слой атмосферы поступают там, где плотность застройки максимальна. К этому добавляется и различие в поглощенной солнечной радиации различными ориентированными «склонами рельефа» застройки. В случае «города-холма» на его северный «склон» поступает (и поглощается) меньше солнечной радиации, чем на южный «склон». В случае «города-чаши» его северная периферия, образующая «склон» южной ориентации, получает и поглощает больше солнечной радиации, чем другие участки застройки. В связи с этим также

происходит смещение «факела» термической конвекции относительно геометрического центра застройки.

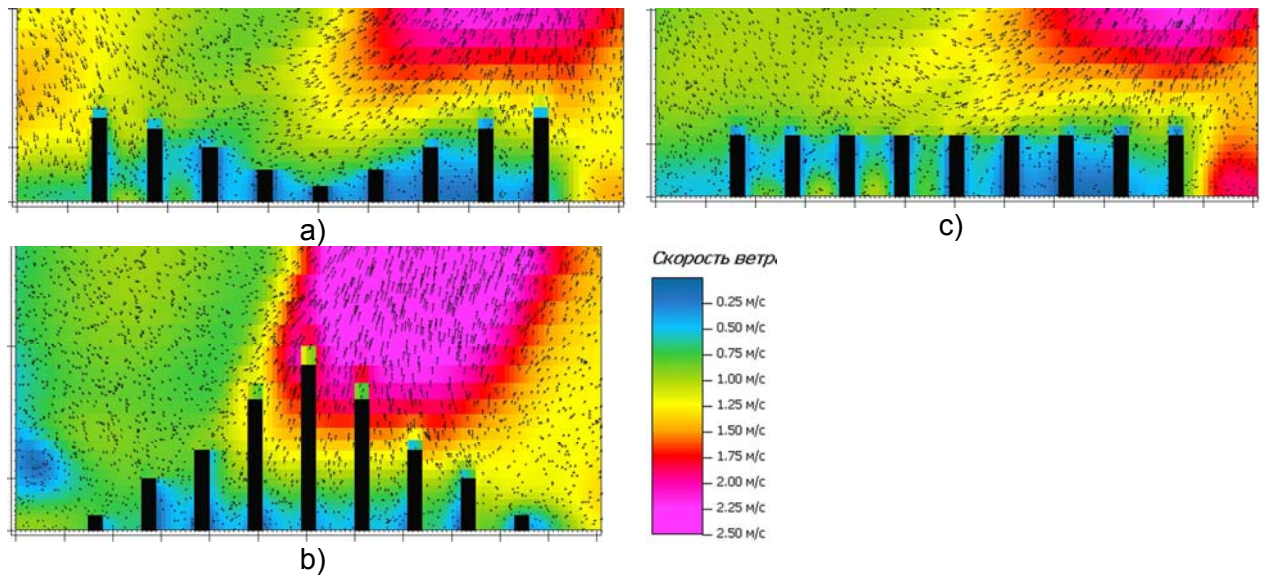


Рис. 8 (а-с). Вертикальный разрез поля скорости ветра по меридиану при термической конвекции: а) «город-чаша»; б) «город-холм»; с) «город-равнина»

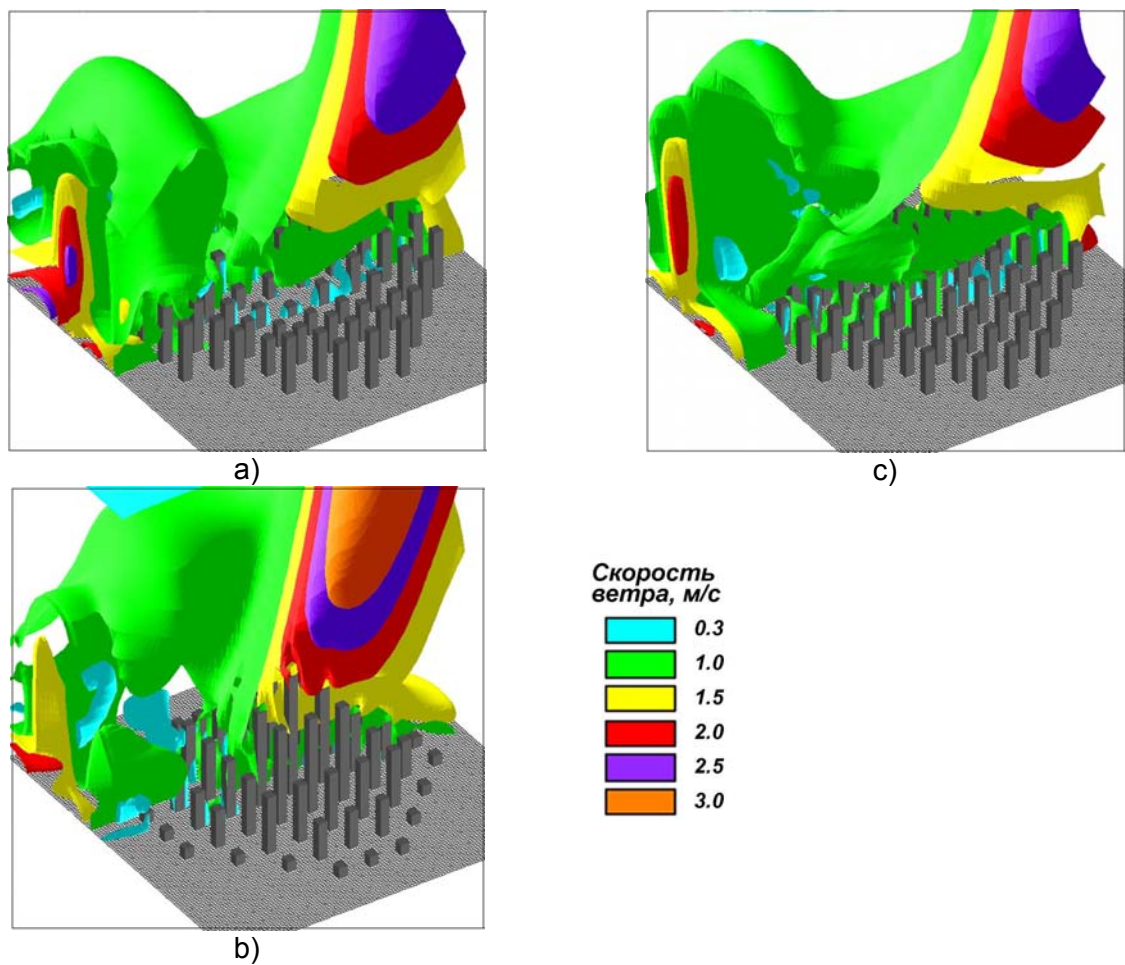


Рис. 9 (а-с). Пространственная структура полей скорости ветра при термической конвекции: а) «город-чаша»; б) «город-холм»; с) «город-равнина»

Это обстоятельство может быть использовано для регулирования ветрового режима путем стимулирования наиболее благоприятных направлений воздушных потоков, поступающих на территорию города из пригородов. Например, к юго-востоку от города пригородная зона имеет максимальный процент озелененных территорий и включает в себя гидрографический объект (озеро, водохранилище и т.п.). Тогда в застройке типа «город-холм» смещение его высотной части в северо-западном направлении при термической конвекции на фоне штилевых погодных условий будут стимулироваться потоки воздуха юго-восточного направления. Таким образом, изменение положения «энергоактивной» высотной части города относительно его геометрического центра будет способствовать поступлению на территорию города свежего чистого прохладного воздуха из наиболее «экологически чистой» части пригородной зоны. Для улучшения воздухообмена между городом и этой территорией целесообразно оставлять в застройке «синие лучи»² – пространства малоэтажной низкоплотной застройки для свободного перемещения воздуха в нужном направлении [11].

Аналогичная ситуация в «городе-чаше» может быть реализована за счет разной высотности его периферийной застройки. Со стороны экологически благополучной части пригородной зоны следует уменьшать высоту застройки, а с противоположной ей стороны – увеличивать. Тогда центральная часть циркуляционной ячейки термической конвекции также сместится по направлению, противоположному от благоприятного, что обеспечит максимальный охват территории города свежим пригородным «бризом».

По сравнению с критериями, выбранными для оценки первой серии расчетов, где C_v рассматривалось как неблагоприятный фактор, для штилевых условий можно принять, что чем выше значение этого критерия, тем благоприятнее условия для естественной вентиляции внутренней среды зданий. Т.е. при малых скоростях ветра высокое значение C_v является, безусловно, благоприятным фактором. Все остальные параметры ранжировались так же – чем выше значение параметра, тем выше его оценка (от 1 до 3 по количеству вариантов расчета, при равных значениях параметра ставились одинаковые баллы). Результаты рейтинговой оценки вариантов застройки по интенсивности индуцируемой термической конвекции представлены в Таблице 4.

Таблица 4. Рейтинговая оценка приемов застройки по ветровому режиму (динамическая конвекция)

Вариант расчета	Фактор				Сумма баллов	Место в рейтинге
	$V_{\max 10}$	$V_{\text{средн}10}$	$V_{Z\text{средн}10}$	C_{v10}		
1.3	1	1	1	1	4	1
2.3	3	3	2	2	10	3
3.3	2	2	2	3	9	2

В этом рейтинге на первом месте оказался тот же морфотип застройки, который был признан наиболее благоприятными для штилевых районов по фактору динамической конвекции – «город-чаша». Не исключено, что по этой причине города именно этого типа получили наибольшее распространение в условиях жаркого сухого климата. «Город-холм» оказался наименее благоприятным из трёх вариантов, заняв три последних места из четырёх позиций. Несмотря на то, что именно его «факел» теплого воздуха выглядит наиболее активным на Рис. 8b и Рис. 9b, создаваемая этим морфотипом застройки термическая конвекция достигает максимального развития слишком высоко над поверхностью рельефа и мало затрагивает приземный слой воздуха.

² по аналогии с «зелеными лучами»

Во многих городах можно найти сочетание рассмотренных выше архитектурных ландшафтов. Для анализа ветрового режима в таких случаях принцип суперпозиции не всегда применим из-за эффекта интерференции волнообразных возмущений воздушных потоков [12]. Например, если какую-либо застройку можно сравнить с холмом, имеющим несколько расположенных рядом вершин, или чашей с несколькими углублениями, то структура поля вынужденной и термической конвекции, являющейся нелинейным и нестационарным процессом [13], будет иметь гораздо более сложный характер [14]. Другими словами, простое суммирование воздействия отдельных элементов городской структуры на воздушные потоки в этих случаях будет неприменимо, для этого потребуется выполнение ряда дополнительных исследований.

В заключение можно добавить, что сделанные выше выводы можно применить и к обособленным расположенным группам зданий и даже отдельным зданиям-комплексам, заблокированным из большого числа секций переменной этажности.

Литература

1. Архитектурная физика: учебник для вузов. Коллектив авторов под ред. Н.В. Оболенского. – М.: «Архитектура-С», 2005. – 448 с.
2. Мягков М.С., Губернский Ю.Д., Конова Л.И., Лицкевич В.К. Город, архитектура, человек и климат. – М.: «Архитектура-С», 2007.
3. СП 42.13330.2011 Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений (Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89*). - Минрегион России, 2010.
4. Grimmond C. S. B. Progress in measuring and observing the urban atmosphere – Theoretical and Applied Climatology, 2006. Vol. 84. - №.1-3. - pp. 3-22.
5. Bruse M. Die vorliegende Dokumentation beschreibt die aktuelle Version von ENVI-met inklusive der vorgenommenen Änderungen. (Einzelne Abschnitte können hierbei noch von der aktuellen Version abweichen), 2004 [Сетевой ресурс]. – URL: <http://www.envi-met.com/documents/Envimet30.PDF>
6. МГСН 1.04-2005 «Временные нормы и правила проектирования планировки и застройки участков территории высотных зданий-комплексов, высотных градостроительных комплексов в городе Москве».
7. Morris A.E.J. History of Urban Form Before the Industrial Revolution (3-d edition). – Harlow: England Pearson Education Ltd., 1994. – 444 p.
8. Rizka A. A., Henze G. P. Improved airflow around multiple rows of buildings in hot arid climates. - Energy and Buildings, 2010. Vol. 42(10). – pp. 1711-1718.
9. Louka P., Belcher S. E., Harrison R. G. Modified street canyon flow. – J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998. № 74-6. – pp. 485-493.
10. Allegrini J., Dorer V., Carmeliet J. Wind tunnel measurements of buoyant flows in street canyons. - Building and Environment, 2013. № 59. – pp. 315-326.
11. Hebbert M., Janković, V., Webb, B. City Weathers: meteorology and urban design 1950-2010. University of Manchester, Manchester Architecture Research Centre [Сетевой ресурс]. – URL:

<http://www.sed.manchester.ac.uk/architecture/research/csud/workshop/2011CityWeathers.pdf>

12. Oke T.R. Boundary layer climates. – London: Routledge, 1999. - 435 p.
13. Miller C.A., Davenport A.G. Guidelines for the calculation of wind speed-ups in complex terrain. - J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998. Vol. 74–76. - pp. 189–197.
14. Hang J., Sandberg M., Li Y. Effect of urban morphology on wind condition in idealized city models. - Atmospheric Environment, 2009. Vol. 43(4). – pp. 869-878.

References

1. *Arhitekturnaja fizika: Uchebnik dlja vuzov* [The Architectural Physics: Textbook for High Schools]. Moscow, 2005, 448 p.
2. Myagkov M.S., Gubernskij Ju.D., Konova L.I., Lickevich V.K. *Gorod, arhitektura, chelovek i klimat* [City, Architecture, Man and Climate] Moscow, 2007, 344 p.
3. SP 42.13330.2011 *Gradostroitel'stvo. Planirovka i zastrojka gorodskih i sel'skih poselenij (Aktualizirovannaya redakcija SNIp 2.07.01-89*)* [Building Code: Urban Planning. Planning and Building of Urban and Rural Settlements (the updated issue of SNIp 2.07.01-89*)]. Minregion Rossii, 2010.
4. Grimmond C. S. B. Progress in measuring and observing the urban atmosphereю – Theoretical and Applied Climatology, 2006, Vol. 84, no.1-3, pp. 3-22.
5. Bruse M. Die vorliegende Dokumentation beschreibt die aktuelle Version von ENVI-met inklusive der vorgenommenen nderungen. (Einzelne Abschnitte können hierbei noch von der aktuellen Version abweichen), 2004. Available at: <http://www.envi-met.com/documents/Envimet30.PDF>
6. MGSN 1.04-2005 «*Vremennye normy i pravila proektirovanija planirovki i zastrojki uchastkov territorii vysotnyh zdaniy-kompleksov, vysotnyh gradostroitel'nyh kompleksov v gorode Moskve*» [Provisional Norms and Rules of Designing and Building of the Sites of High-rise Buildings-complexes, High-rise Urban Complexes in the City of Moscow], 2005.
7. Morris A.E.J. History of Urban Form Before the Industrial Revolution (3-d edition). Harlow: England Pearson Education Ltd., 1994, 444 p.
8. Rizka A. A., Henze G. P. Improved airflow around multiple rows of buildings in hot arid climates. - Energy and Buildings, 2010, Vol. 42(10), pp. 1711-1718.
9. Louka P., Belcher S. E., Harrison R. G. Modified street canyon flow. J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, no. 74-6, pp. 485-493.
10. Allegrini J., Dorer V., Carmeliet J. Wind tunnel measurements of buoyant flows in street canyons. Building and Environment, 2013, no 59, pp. 315-326.
11. Hebbert M., Janković, V., Webb, B. City Weathers: meteorology and urban design 1950-2010. University of Manchester, Manchester Architecture Research Centre. Available at: <http://www.sed.manchester.ac.uk/architecture/research/csud/workshop/2011CityWeathers.pdf>
12. Oke T.R. Boundary layer climates. London: Routledge, 1999, 435 p.

13. Miller C.A., Davenport A.G. Guidelines for the calculation of wind speed-ups in complex terrain. J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, Vol. 74–76, pp. 189–197.
14. Hang J., Sandberg M., Li Y. Effect of urban morphology on wind condition in idealized city models. - Atmospheric Environment, 2009, Vol. 43(4), pp. 869-878.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

М.С. Мягков

Кандидат технических наук, профессор кафедры «Архитектурная физика», Московский архитектурный институт (государственная академия), Москва, Россия
e-mail: eco-climate@mail.ru

Л.И. Алексеева

Кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
e-mail: rapira2005@yandex.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

M.S. Myagkov

Candidate of technical sciences, professor of department «Architectural physics», Moscow Institute of Architecture (State Academy), Moscow, Russia
e-mail: eco-climate@mail.ru

L.I. Alekseeva

Candidate of geographical sciences, assistant professor, senior researcher, Geographical faculty, Chair of meteorology and climatology, Moscow State University, Moscow, Russia
e-mail: rapira2005@yandex.ru