

МИКРОКЛИМАТ И БИОКЛИМАТИЧЕСКАЯ КОМФОРТНОСТЬ ТРАДИЦИОННОЙ АРАБСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

УДК 551.58:72.031.2(=411.21):004.9

DOI: 10.24411/1998-4839-2019-00017

М.С. Мягков*Московский архитектурный институт (государственная академия), Москва, Россия*

Аннотация

Биоклиматическая комфортность является наиболее важным параметром и обязательным условием архитектурной среды. Известно, что каждому типу климата соответствуют определенные типы планировки и застройки, выработанные местным населением в результате многовекового опыта и обеспечивающие максимально комфортные условия проживания при потреблении минимального количества ресурсов для строительства и эксплуатации. В условиях происходящего потепления, которое, как полагают, обусловлено антропогенной деятельностью, особое внимание привлекают архитектурные традиции стран с жарким сухим климатом. Учитывая это, в статье рассматриваются микроклиматические механизмы, обеспечивающие биоклиматическую комфортность традиционной арабской¹ архитектуры. Для их изучения использован метод математического моделирования, реализованный в программном комплексе ENVI-met. Показано, как эти механизмы формируются и работают в реальных условиях и как их можно применять в современной архитектурно-строительной практике.²

Ключевые слова: биоклиматическая комфортность, традиционная архитектура, арабская архитектура, микроклимат городской среды, климат города, ENVI-met

MICROCLIMATE AND BIOCLIMATIC COMFORT OF TRADITIONAL ARAB URBAN STRUCTURE

M. Myagkov*Moscow Institute of Architecture (State Academy), Moscow, Russia*

Abstract

Bioclimatic comfort is the most important parameter and a prerequisite of the architectural environment. It is known that each type of climate corresponds to certain types of architecture and planning, possessed by the native population as a result of centuries of experience. These types provide the most comfortable living conditions with the consumption of a minimum amount of resources in the construction and operation. In the context of the ongoing global warming, which is believed to be caused by anthropogenic activities, special attention is drawn to the architectural traditions of countries with hot dry climates. With this respect the article discusses the microclimatic mechanisms that provide bioclimatic comfort of traditional Arab architecture. The study was based on the mathematical modeling method implemented in the software ENVI-met. It is shown how these microclimatic mechanisms forms and works in real conditions and how they can be used in modern architectural and construction practice.³

Keywords: bioclimatic comfort, traditional architecture, Arab architecture, microclimate of urban environment, urban climate, ENVI-met

¹ Определение «арабская» используется для краткости. На самом деле эта архитектура имеет более широкое географическое распространение, о чем будет сказано в тексте статьи.

² **Для цитирования:** Мягков М.С. Микроклимат и биоклиматическая комфортность традиционной арабской застройки // Architecture and Modern Information Technologies. – 2019. – №4(49). – С. 235-261. – URL: https://marhi.ru/AMIT/2019/4kvart19/PDF/16_myagkov.pdf DOI: 10.24411/1998-4839-2019-00017

³ **For citation:** Myagkov M. Microclimate and Bioclimatic Comfort of Traditional Arab Urban Structure. Architecture and Modern Information Technologies, 2019, no. 4(49), pp. 235-261. Available at: https://marhi.ru/AMIT/2019/4kvart19/PDF/16_myagkov.pdf DOI: 10.24411/1998-4839-2019-00017

Учитывая изменения климата, которые, как ожидается, будут направлены в сторону потепления, большинство жилых и общественных зданий в умеренном климате могут подвергаться перегреву в летнее время, что потребует для каждого региона разработки необходимого минимума мер по климатической адаптации застройки. Исходя из этого и учитывая ожидаемый рост температуры воздуха Северного полушария, такие адаптационные приемы можно заимствовать из архитектурно-строительных традиций стран, исходно находящихся в жарком климате – субтропическом и тропическом континентальном, т.е. стран Северной Африки и Ближнего Востока. Поэтому изучение климатозащитных функций традиционной арабской застройки представляет особый интерес в расчете на практическое применение некоторых, характерных для нее способов защиты от высоких температур и избыточной солнечной радиации.

Биоклиматическая комфортность является наиболее важным параметром и обязательным условием архитектурной среды. Её отсутствие не компенсируется ни эстетическими свойствами архитектурных решений, ни экономичностью строительства и эксплуатации зданий, ни какими-либо другими способами. В условиях глобализации всего цивилизационного процесса и архитектуры в частности, нередко наблюдается внедрение одних и тех же архитектурных приемов в самых разных природно-климатических условиях. Наиболее типично применение западных (европейских, североамериканских) приемов планировки и застройки на любой широте и долготе Земного шара. На самом деле европейские и позже унаследованные американцами архитектурно-строительные традиции характерны для достаточно комфортного умеренного морского климата, характеризующегося мягкой зимой и комфортной летней погодой. Здания и сооружения в таких условиях несут минимальную климатозащитную нагрузку. В других природно-климатических районах такая архитектура оказывается непригодной для длительного пребывания из-за перегрева в летнее время в странах с более жарким климатом или переохлаждения зимой в странах с более суровым типом климата, например – тем же умеренным, но континентальным или резко-континентальным климатом, типичным для большей части территории России.

В процессе организованного во всемирном масштабе навязывания западных ценностей и традиций, в том числе архитектурно-градостроительных, в арабских странах также происходит замена традиционных архитектурных и градостроительных приемов на западные, считающиеся национальными элитами универсальным образцом для подражания (рис. 1). Проводниками этих идей в жизнь являются арабские архитекторы, получившее «престижное» архитектурное образование в Западной Европе или Америке, а также непосредственные заказчики из правящих сословий, обладающих значительными финансовыми ресурсами и поэтому окруженные пристальным вниманием со стороны западных архитектурно-строительных компаний [1]. Так или иначе, всё это влияет на современную арабскую архитектуру, причем часто – с негативными последствиями – утратой самобытности и «духа места», забвением национальных культурных традиций, нарушением традиционного уклада жизни, в том числе его исламских религиозных особенностей и т.д. [2]. Вместе с этим, при замене традиционных архитектурно-строительных форм на западные теряются климатозащитные свойства застройки, резко снижается ее биоклиматическая комфортность, особенно в странах с экстремальными типами климата, как, например, жарком и сухом. Это требует в дальнейшем при эксплуатации «западной» архитектуры в несвойственных ей природно-климатических условиях применения дополнительного инженерного и климатического оборудования, делающего хотя бы внутреннюю среду зданий и сооружений пригодной для длительного пребывания и проживания [3]. Это оборудование потребляет огромный объем энергетических ресурсов. Такая расточительная архитектурно-строительная практика не может быть признана «зеленой» или «устойчивой», даже если на покрытие возрастающих потребностей используется энергия возобновляемых источников, например – солнечных или ветровых электростанций.

Чтобы избежать необходимости избыточного энергопотребления на климатизацию внутренней среды зданий, можно обратиться к архитектурно-строительным приемам

поддержания биоклиматической комфортности пассивными способами, выработанным коренным населением в результате многовекового опыта приспособления к местным природно-климатическим особенностям. Эти приемы можно наблюдать как на градостроительном, так и архитектурно-строительном уровне. Так, например, планировка городов с холодным или жарким климатом отличается компактностью, планировка городов в комфортных климатических условиях более свободная. То же касается объемно-планировочных решений и режима эксплуатации жилых и общественных зданий: от максимума компактности (минимум поверхности при максимуме объема) зданий в экстремально холодном и жарком сухом типах климата, до свободного, расчлененного плана и объема в комфортном и жарком влажном типах климата. Это объясняется тем, что в комфортных условиях здания и застройка в меньшей степени несут климатозащитные функции.



Рис. 1. Проектное предложение строительства «европейского» торгового квартала «Бульвар» в Дубае (ОАЭ), которое предусматривает устройство купола для создания в застройке искусственного микроклимата

Рассматривать климатозащитные функции через физические механизмы взаимодействия застройки и зданий с приземным слоем атмосферы лучше на примере архитектуры стран с экстремальными типами климата, причем тех из них, которые имеют наиболее длительную историю освоения и наиболее плотное население в настоящее время. Если говорить о приспособлении к сухому жаркому климату, то это – страны с континентальным топическим и субтропическим климатом – государства Ближнего Востока, Северной Африки, Иран, Пакистан и др.

Изучению микроклиматических условий в традиционной для арабских стран с жарким сухим (аридным) климатом застройке посвящено довольно много фундаментальных работ [4, 5, 6]. Микроклиматические свойства такой застройки часто упоминаются в различных обзорах и исследованиях, посвященных вопросам, не связанным именно с микроклиматом, а обращающих внимание на другие особенности и свойства этой архитектуры – культурно-исторические, социально-экономические, религиозные, этнические и т.д. Большинство из таких публикаций в части изучения микроклимата застройки носят умозрительный, качественный характер. «Работа» застройки по защите от неблагоприятных природно-климатических воздействий кажется достаточно очевидной и не требующей детальной интерпретации. По нашему мнению, такой подход является поверхностным, обоснование этого мнения – ещё одна цель представленного исследования.

Под традиционной арабской жилой застройкой принято понимать особый морфотип, характеризующийся плотной застройкой жилыми зданиями, как правило 2-этажными, с плоскими кровлями и внутренними дворами. Внешние стены практически без окон, помещения выходят во внутренний двор. Здания располагаются вдоль узких улиц, ширина которых редко превышает 1–0.5 высоты зданий. Такие жилые массивы с «ковровой» застройкой пересекаются более широкими улицами общегородского значения, на которых сосредоточены здания и участки, выполняющие общественные функции – торговля, культовые сооружения, по ним движется транспорт и т.д. Причем, узкие жилые улицы пересекаются с более широкими под почти прямым углом. Такой тип застройки называют *гелиотермической* имея в виду, что она ограничивает поступление солнечной радиации и избыточного тепла к зданиям за счет их взаимозатенения. Кроме того, повышенная плотность застройки и минимальная ширина улиц могут препятствовать пылеветровому воздействию на жилые дома и открытые участки застройки (включая внутренние дворы). При этом ориентация застройки зависит не только от инсоляционного фактора, но и от того, с какой стороны наиболее часто наблюдаются неблагоприятные ветры, несущие пыль, песок и перегретый воздух с прилегающих пустынных территорий. Поэтому такую застройку можно назвать *аэро-гелиотермической*. Однако, поскольку эти климатозащитные свойства застройки кажутся очевидными [7, 8], практически ни в одной работе не раскрывается физическая сущность микроклиматических механизмов, обеспечивающих эту защиту. Тем не менее, необходимо иметь ответы на вопросы, которые невозможно получить на основании лишь умозрительного качественного анализа. Например: за счет чего обеспечивается естественная вентиляция помещений (если, конечно, в застройке не применяются втроулавливающие башни – «бадгиры»? Почему внешние потоки перегретого пыленесущего ветра мало влияют на микроклимат внутренних дворов? Нужно ли выполнять озеленение этих дворов и узких жилых улиц или перекрывать их светопрозрачными конструкциями? и т.д.

Ещё одной современной тенденцией в арабо-исламской архитектуре является ее приспособление к современным условиям и стилям с учетом исторически сложившихся архитектурно-градостроительных традиций. Аль-Рагам [1] описывает это как «архитектуру сопротивления», предполагающую четыре универсальные формы такого «сопротивления»: модернизацию, синтезирование (гибридизация), консервативное сохранение архитектурного наследия и, наконец, энвайронментализацию (*environmentalization*) современной архитектуры (т.е. приспособление современных архитектурных форм к условиям окружающей среды теми же средствами, которыми была приспособлена к окружающей среде традиционная арабо-исламская архитектура). В богатых нефтедобывающих арабских странах наиболее широко распространено сочетание синтеза и гибридизации международного стиля с традиционной архитектурой, предполагающее интеграцию старого и нового. К сожалению, во многих случаях, этот подход носит чисто иллюстративный характер в части заимствования орнаментальных и пластических приемов традиционной архитектуры при строительстве современных зданий, создание псевдо-традиционных архитектурных форм для привлечения туристов, а не с целью использования архитектурных традиций для повышения биоклиматической комфортности для местных жителей.

В то же время имеются отдельные примеры более перспективной и эффективной формы гибридизации, принимающей во внимание культурные и экологические истоки региональной архитектуры так же, как и ее исламские начала. Эта тенденция очень важна с точки зрения именно биоклиматических свойств традиционной архитектуры, поскольку включает традиционные приемы приспособления архитектуры к климатическим условиям в высокотехнологичном строительстве [3]. Именно биоклиматическая комфортность в экстремальном типе климата является одним из наиболее важных свойств архитектурной среды традиционной арабо-исламской застройки. Это ее свойство ставится на одно из первых мест при оценке обеспечения ею потребностей жителей. Так, исследования, проведенные среди жителей разных регионов Саудовской Аравии [9], показали, что среди основных потребностей, обеспечиваемых жилищем, биоклиматический комфорт

занимает первое место. На последующих местах по порядку убывания находятся: надежность жилища; безопасность проживания в доме; его внешний вид; обеспечение приватности внутренней среды и, наконец, его статусность (рис. 2). Большинство опрошенных хотели бы улучшить в своих жилищах именно климатическую комфортность, что говорит о том, что именно микроклиматические условия застройки и внутренней среды зданий больше всего волнуют жителей на бытовом уровне. Причем, под микроклиматическими условиями жители подразумевали не только температурно-влажностный режим помещений и открытых участков городской застройки, но и влияние ветров из окружающих пустынных районов, несущих перегретый воздух и механические примеси (пыль, песок).

Аналогичные результаты были получены при опросах жителей исторических городов в ОАЭ [10]. Большинство жителей отмечает, что традиционная застройка имеет преимущество перед современной в части обеспечения комфортности внутренней среды. Проведенный опрос, позволивший количественно оценить ответы на вопросы об этом свойстве архитектурной среды, показал, что традиционные жилые здания обеспечивают внутреннюю вентиляцию и тепловой комфорт в 1.5–2 раза лучше современных. Одновременно с этим, большинство респондентов отметили, что традиционная архитектура предпочтительней и в других аспектах: приватности, социальных связей, организации взаимоотношений внутри семьи, самоидентификации и социального статуса и т.д.

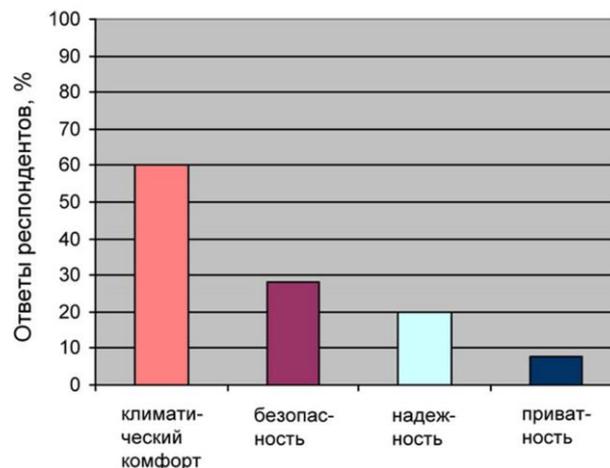


Рис. 2. Свойства жилища, которые жители хотели бы улучшить в первую очередь (в Саудовской Аравии) (по [9])

Как было отмечено выше, «типичная» традиционная арабо-исламская жилая застройка распространена в сухом жарком тропическом и субтропическом континентальном климате. Именно в этих районах она имеет свои наиболее характерные черты (рис. 3). Поэтому сохранение традиционных приемов обеспечения микроклиматических условий в застройке и жилых домах является наиболее важной задачей для современной арабо-исламской архитектуры, в каком бы направлении ни пошло ее развитие – полного сохранения традиций или модернизации и гибридизации.

Чтобы выяснить, за счет чего традиционная арабо-исламская жилая застройка обеспечивала веками относительный комфорт в интерьере и экстерьере и что следовало бы у нее перенять, развивая арабскую архитектуру, смешивая вековые традиции и современный международный стиль, необходимо более глубоко и детально изучить микроклиматические механизмы и свойства этого морфотипа застройки. Это также дало бы возможность применять некоторые архитектурно-строительные климатозащитные приемы при застройке в других странах при необходимости защиты жилой среды от аналогичных неблагоприятных природно-климатических явлений, что особенно актуально

в условиях ожидаемого глобального потепления и аридизации климатических условий в более высоких широтах, например – в южных районах пояса умеренного континентального и резко-континентального климата.

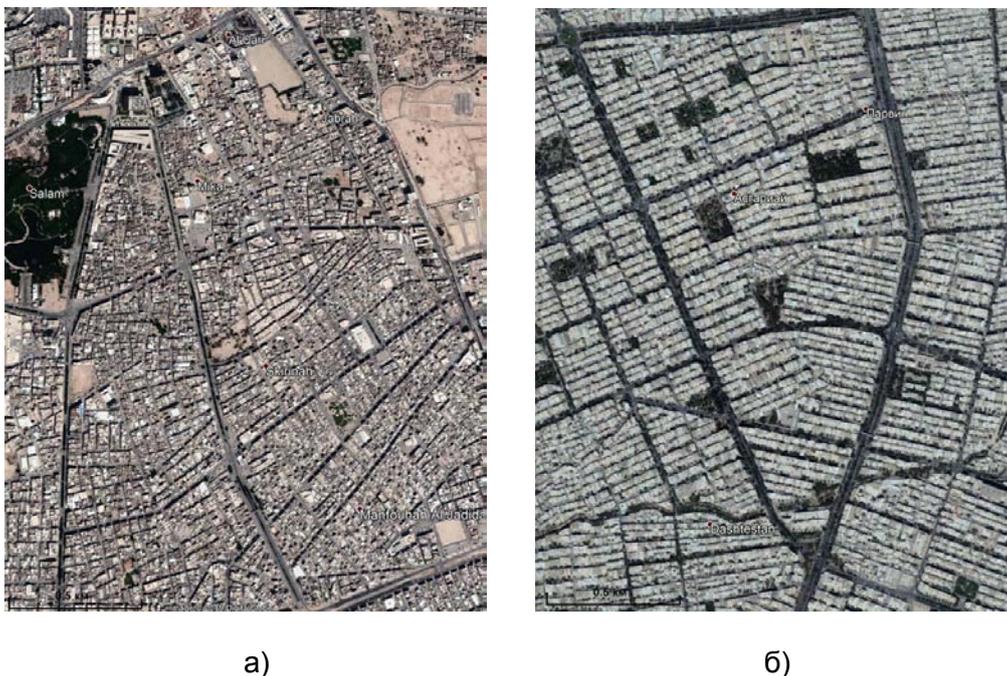


Рис. 3. Фрагменты исторической городской жилой застройки в странах с континентальным тропическим (жарким сухим) климатом: а) центральные районы Эр-Рияда, Саудовская Аравия; б) историческая застройка Исфахана, Иран (изображения по «Google Earth»)

Для того, чтобы более глубоко и детально изучить механизм климатозащиты традиционной арабо-исламской архитектуры, нами был выполнен анализ ее взаимодействия с солнечной радиацией и ветровыми потоками. Для этого климатозащитные функции, которые очевидны и многократно описаны на качественном уровне, были смоделированы с использованием современного программного обеспечения. Это позволило выявить количественное соотношение вклада отдельных факторов, более подробно описать физические «защитные механизмы», дать оценку их возможного нарушения при модификации существующих жилых домов традиционной постройки и внедрения приемов и планировки и застройки в ходе заимствования европейских архитектурных тенденций. Это также позволило не только качественно-количественно оценить «работу» застройки, но и выявить основные физические закономерности и климатические процессы микро-уровня, некоторые из которых оказались совсем не очевидными.

Климатический фон

Граничными условиями для моделирования микроклиматической ситуации в застройке служит ее *климатический фон*, т.е. основные климатические характеристики, в первую очередь – радиационный, температурно-влажностный и ветровой режимы. Кроме фона к граничным условиям относятся изменяющаяся во времени характеристики интенсивности внешнего аэро- и термодинамического воздействия, которыми в данном случае выступают приход прямой и рассеянной солнечной радиации и меняющие свою интенсивность в течение суток ветровые потоки, набегающие на застройку с окружающей территории.

В качестве примера для моделирования нами рассмотрен гипотетический участок городской застройки, расположенный в континентальном тропическом климате. Тропические климаты наблюдаются в районах, где в течение всего года преобладают тропические воздушные массы, в ландшафтом отношении они соответствуют тропическим пустыням и называются «аридными». Для этого типа климата характерны: крайняя сухость, исключительно жаркое лето, большая запыленность воздуха и большая годовая и суточная амплитуда температуры воздуха. Поскольку испаряться здесь практически нечему (иногда за год выпадает менее 100 мм осадков, причем летом их не бывает вообще), вся солнечная энергия затрачивается на нагревание рельефа и от него – приземного слоя атмосферы. По международной типизации климатов Кёппена-Треварта такой тип климата обозначается «BWh» (климат тропических и субтропических пустынь). Этот тип климата распространен в Северной Африке, на большей части Ближнего Востока, всём Аравийском полуострове и далее на восток по югу Ирана, Пакистана вплоть до западной части Индии. В Западной Европе климат типа BWh не встречается. Это говорит о том, что климатозащитные функции, выполняемые зданиями в Западной Европе и на Ближнем Востоке, имеют принципиальные отличия, что отражается на их типологических характеристиках, а западноевропейские архитектурно-градостроительные традиции совершенно не подходят для арабских стран.

К граничным условиям модели также относятся ее пространственные характеристики (геометрия) и теплофизические свойства объектов в модели (здания и сооружения, поверхность рельефа, свойства почвогрунтов). Поэтому очень важным этапом в подготовке к моделированию является выбор объемно-планировочных решений зданий, их размеров и пропорций, взаиморасположения, ширины улиц, типа мощения улиц и дворов и т.д. Типичным для стран с жарким сухим климатом считается сетка улиц и жилых кварталов с планом, близким к ортогональному. Ориентация улично-дорожной сети и застройки, как правило, ориентирована с учетом сторон горизонта [11], если этому не препятствуют особенности рельефа. На практике идеальных в геометрическом отношении вариантов такой планировки не встречается, особенно в исторических частях городов, где линии улиц и застройки имеют кривизну продольного профиля, домовладения различаются по размерам и объемно-планировочному решению, наличию или отсутствию внутренних дворов, различному расположению и использованию общественных пространств и т.п. Ориентация кварталов и улиц также почти никогда не совпадает с направлениями север–юг, запад–восток. Можно предположить, что эти отклонения носят не случайный характер, а допускаются сознательно. Не случайно, наверное, идеальная прямизна и точная ориентация не были догматизированы ни в одной культуре, существовавшей в таких условиях многие тысячелетия (начиная с Древнего Царства Египта). Забегая вперед, можно предположить, что некоторое нарушение прямолинейности, ориентации и других форм строгой упорядоченности носит не только стихийный характер, но и имеет свое микроклиматическое оправдание.

В целях генерализации застройки для моделирования улицы были условно подразделены на два основных типа по функциям и, соответственно, ширине – общегородские и жилые. Общегородские улицы шире, насыщены общественными функциями, ориентируются на равнинной местности часто по направлению С-Ю или СЗ–ЮВ с небольшими отклонениями, обусловленными особенностями рельефа или трассировкой исторических путей межселенного сообщения. Жилые улицы – узкие, только для пешеходных связей жилых кварталов с общественными местами, часто расходятся почти перпендикулярно от общегородских улиц (рис. 3).

Такой тип застройки, характерный в настоящее время для большинства стран Арабского Востока, демонстрирует удивительную устойчивость в пространстве и во времени, что позволяет говорить о том, что факторы, его формирующие, связаны не только с национально-культурными и религиозными традициями, но и с определенными внешними природно-климатическими причинами. Так, например, А. Рапопорт собрал более двухсот очень похожих друг на друга примеров домов с внутренними дворами, которые происходят из разных мест более сорока стран, охватывающих весь Земной шар и

исторический период десять тысяч лет: «...из Чатала Хюк (10 000 л.н.), через долины Индской цивилизации (5 000 лет до н.э.), древний Ближний Восток (Турция, Месопотамия, Ур и др.), Китай, Древняя Греция и Рим, по настоящее время» [12]. Однако, он ставит микроклимат лишь на пятое место, причем оспаривает эффективность такого рода объемно-планировочных решений для некоторых стран с жарким влажным климатом, с чем мы не можем не согласиться.

Рапопорт сделал ещё одно важное замечание: «Способность прототипов домов с внутренними дворами сформировать плотную городскую ткань (одно из своих предполагаемых преимуществ), таким образом, не зависит только от конкретных социальных условий <...> Такие дома формируют плотную компактную ткань, что обеспечивает минимальное время экспозиции при пешеходных связях между жилищем и общественными зданиями и территориями общегородского назначения (базары, культовые, учебные, медицинские и т.д.). Так что компактность здесь – это не экономия территории (в которой нет необходимости), а следствие неблагоприятного климатического воздействия на пешехода» [12]. Также он отмечает, что такая городская ткань, так же как и внутренние дворы, не случайно почти лишены растительности. Это – не следствие плотности застройки или компактности зданий, а та же эргономика: зеленые насаждения, особенно плотные, мешают свободному движению воздуха и повышают его влажность, что при высоких температурах снижает биоклиматическую комфортность.

Размерность и конфигурация территории и жилищ

С точки зрения исследования взаимодействия городской застройки с солнечной радиацией и ветровыми потоками наиболее важными параметрами являются размерность жилища, взаиморасположение отдельных зданий, их блокировка, ширина улиц, их геометрия и ориентация улично-дорожной сети по сторонам света, пропорции кварталов. Учитывая нелинейность процессов аэро- и термодинамики, важно было найти правильные пропорции и размеры для этих объектов. Если принять эти размеры и пропорции неправильно, то, например, циркуляционные механизмы, возникающие за счет термической (вызванной нагреванием инсолируемых частей зданий и участков рельефа) и вынужденной (обтекание воздухом препятствий) конвекции будут выражены или слишком слабо, или утрированно, что может повлечь за собой ошибочные выводы относительно их вклада в обеспечение биоклиматической комфортности.

В общем случае домовладения в исторической части застройки арабских городов могут иметь достаточно произвольную форму, обусловленную особенностями исторического развития городской ткани. Отдельные домовладения могли многократно делиться или объединяться в различной последовательности, поэтому многие из них могут быть углублены внутрь кварталов, иметь один или два внутренних двора различного размера, по-разному расположенных, состоять из двух и более смещенных относительно друг друга участков и т.д. (рис. 3, 4). Однако можно предположить, что в первоначальном состоянии они имели прямоугольную форму, с двором в центральной или дальней от улицы части домовладения. Такая планировка обеспечивает максимальную компактность и эргономичность домовладения и подтверждается планировкой, вскрываемой при раскопках, и планировкой, применяемой при современной застройке по историческому типу.

Размеры домовладений зависят от многих факторов социально-экономического характера: уровня благосостояния жителей, национальных традиций, численности и гендерного состава семей, количества совместно проживающих поколений и т.д. В качестве примера можно привести историческую застройку города Эр-Рияд в Саудовской Аравии, где традиционная форма дома была продиктована как его климатом, так и местными культурно-религиозными традициями (рис. 4). Исламские ценности, а также социально-экономические факторы играли решающую роль в архитектуре отдельных жилых домов и всей городской застройки в историческое время вплоть до 1950-х годов. Позже, в результате открытия и начала эксплуатации нефтяных месторождений, начался

быстрый экономический рост, который резко повысил благосостояние населения. В результате появилась тенденция формирования нового образа жизни, ориентированного на западные ценности. Стала перекраиваться городская ткань, жилые дома типа вилл и отдельно стоящих особняков начали строиться из железобетона, с большими окнами и балконами. Эта тенденция стала характерной для большинства арабских нефтедобывающих стран, особенно их центральных городов. В то время как традиционная жилая застройка с внутренними дворами создавала атмосферу приватности и собственный микроклимат, современный тип застройки из отдельно стоящих каменных зданий, разделенных открытыми пространствами, нарушил и то, и другое, создав фундаментальные проблемы для традиционных арабских семей.



Рис. 4. Прототип моделируемой застройки: г. Йезид, Иран (по [11])

Согласно [13], традиционные арабско-исламские жилые дома делятся на четыре типа исходя из положения внутреннего двора: 1) с центральным внутренним двором, окруженным жилыми помещениями; 2) U-образный двор, где пространства окружают двор с трех сторон; 3) Г-образный двор, в котором внутренний двор занимает один угол здания; 4) с двором, разделенным на части (как правило – две) в соответствии с потребностями для разделения между приватным и общим входами в дом. Наиболее распространены в рядовой застройке планировочные решения домов первого типа (рис. 5).

Внутренние дворы имеют прямоугольную форму, а их размеры и пропорции зависят от нужд жильцов и истории постройки. Если внешние стены домов имеют ограниченное количество небольших по размерам светопроемов и один вход со стороны улицы, то стены, окружающие внутренний двор, имеют небольшую толщину и большое количество проемов (окон и дверей), которые объединяют помещения, примыкающие к внутреннему двору. Длина и ширина внутренних дворов обычно сомасштабна глубине примыкающих помещений и размерам всего плана зданий. Исходя из этих соображений, для дальнейшего моделирования и изучения микроклиматического режима были выбраны условные домовладения размером 18×12 м с внутренним двором размером 4×6 м, расположенным по центру плана домовладения (рис. 5, 6).

Улицы моделировались двух типов: «жилые» (ширина 5 м), имеющие одинаковую ориентацию и две перпендикулярные друг другу «общегородские» (ширина 15 м и 20 м). Место пересечения общегородских улиц образовало «площадь», ее микроклиматический режим рассматривался отдельно.



Рис. 5. Традиционный арабо-исламский жилой дом в Саудовской Аравии с центральным внутренним двором, окруженным жилыми помещениями (по [9] в авторской интерпретации)

Областью моделирования являлась территория застройки физическим размером 200×200 м, включающая четыре одинаковых «квартала» размером 80×80 м, в каждом из которых размещалось 24 жилых постройки, объединенных в три блока, разделенных «жилыми» улицами (рис. 6). «Кварталы», в свою очередь, были разделены двумя сквозными «общегородскими» улицами. Коэффициент застроенности моделируемой территории составил 60%.

Начальные условия

Начальные условия определяют состояние приземного слоя атмосферы на начало моделируемого периода. В качестве примера были выбраны климатические характеристики⁴ города Эр-Рияд (Саудовская Аравия). При моделировании за начальные условия принимались показатели температуры и влажности воздуха, скорости и направления ветра самого долгого по солнечному сиянию дня – 21 июня, с учетом их внутрисуточных колебаний.

За начало моделируемого периода принято время 6 часов утра (по солнечному времени), когда радиационный баланс застройки равен 0, количество поглощаемой и излучаемой радиации и баланс конвективного теплообмена территории застройки и приземного слоя атмосферы уравновешены, температура поверхностей в застройке (рельеф, стены, кровли) и воздуха выровнена. Радиационная температура и температура поверхности

⁴ По данным: <http://www.weatherbase.com/weather/weatherdaily.php3?s=404380&cityname=Ar-Riyad-Ar-Riyad-Saudi-Arabia&month=6&theday=21&units=metric> (дата обращения 15.08.2019)

элементов рельефа и наружных поверхностей зданий и сооружений равны [14]. Моделирование проводилось для 14-часового периода, до 20:00, когда радиационный баланс территории застройки снова становится равным 0 и переходит к отрицательным значениям.

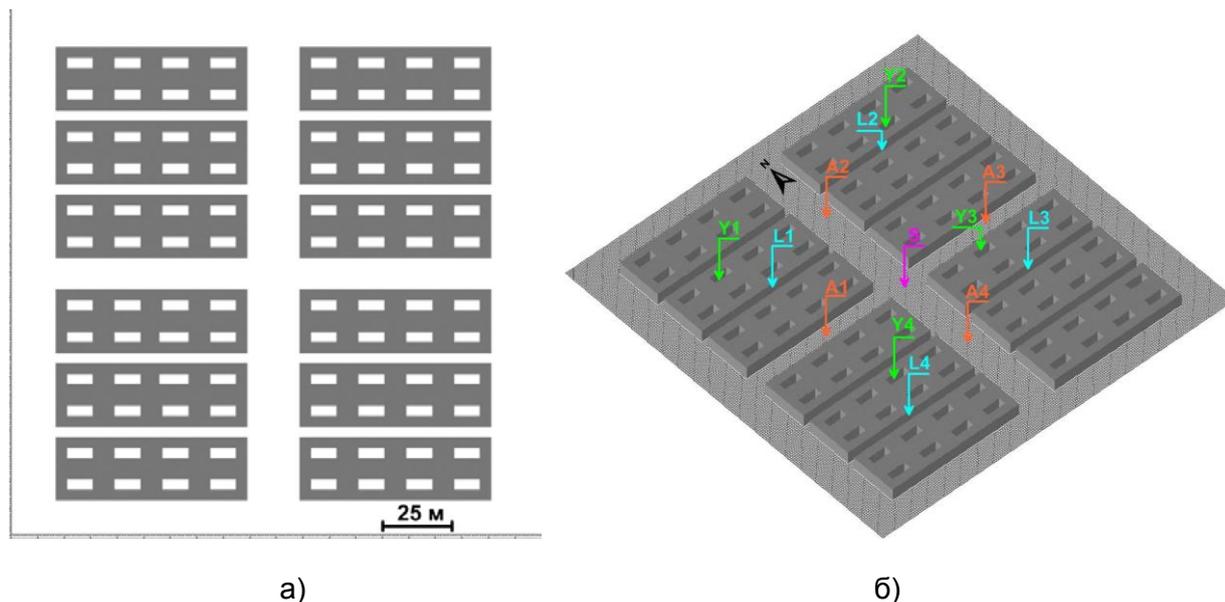


Рис. 6. Общий вид моделируемой территории: а) план; б) оксанометрия с «точками наблюдения» (Y – внутренние дворы, L – жилые улицы, A – общегородские улицы, S – городская площадь)

Начальное *направление ветра* принято с севера, что характерно для лета в средней и южной периферии тропической области высокого давления в Северном полушарии. Скорость ветра в этих условиях определяется только барическим градиентом, местная термическая конвекция в утренние часы не выражена. Поскольку в средней периферии летом преобладают слабоградиентные (размытые) барические поля, *скорость ветра* невелика, поэтому принято начальное значение 2 м/с (исходя из среднесуточного значения 3 м/с). Такой ветер не оказывает ощутимого механического воздействия на жителей и застройку, не вызывает дефляции средне- и мелкозернистого песка и супеси, т.е. количество переносимой им пыли невелико.

Температура воздуха в утренние часы минимальна в суточном ходе. Исходя из среднесуточной температуры 36°C и средней суточной амплитуды 22°C, начальная температура воздуха принята 25°C при влажности 40% (при среднесуточном значении 10%).

Математический аппарат

Математическое моделирование микроклиматического режима в городской застройке выполнялось с использованием программного комплекса ENVI-met, включающего вихреразрешающую негидростатическую аэродинамическую модель, описывающую физические процессы мезо- и микромасштабной циркуляции воздуха с учетом его молекулярного, конвективного и радиационного теплообмена со зданиями и подстилающей поверхностью. Кроме того, в модель включен расчетный модуль, учитывающий влияние инсоляции на тепловой баланс территории и зданий, и дополнительные встроенные расчетные модули, учитывающие влияние растительности и теплофизических характеристик подстилающих грунтов, зданий и сооружений на вынужденную (динамическую) и индуцированную городской застройкой термическую конвекцию. Такие модели называются «дневными». Указанные особенности отличают

использованную модель от других т.н. CFD-моделей⁵, применяющихся в строительстве и архитектуре и описывающих только вынужденную конвекцию и турбулентность, возникающие при обтекании препятствий. Без учета динамики радиационно-теплого баланса и связанных с этим теплофизических процессов моделируемые с помощью т.н. «ночных» моделей микроклиматические параметры городской среды часто существенно отличаются от результатов инструментальных наблюдений [15]. 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)⁶.

Анализ результатов моделирования

Способность застройки за счет своей структуры и теплофизических свойств модифицировать поле ветра и температурно-теплого режима, а, следовательно, и показателей биоклиматической комфортности, оценивалась путем моделирования деформации воздушного потока (динамической конвекции), нагревания и теплообмена элементов застройки и рельефа с окружающим пространством и испарением почвенной влаги. Всего было выполнено три варианта численного моделирования микроклиматической ситуации для выбранного участка застройки: жилые улицы расположены по широте; под углом 45° к направлению запад-восток и по долготе, по направлению север-юг (рис. 7). Это дало возможность сравнить радиационно-тепловой режим застройки при разной экспозиции жилых улиц к солнцу и ветру. Направление фонового ветра во всех трех ситуациях принималось одинаковым – с севера на юг.

Моделируемая территория была разбита на регулярную сетку с шагом 1 м (всего 40401 узел сетки в плане), по вертикали моделируемый объем имел 25 уровней с телескопическим шагом по высоте: первые 7 м интервал по высоте составлял 1 м, выше интервал увеличивался на 10% на каждом шаге. Таким образом весь массив включал более 1 млн. узлов, в каждом из которых рассчитывались микроклиматические и теплофизические параметры, а также параметры биоклиматической комфортности (всего 32 параметра). Шаг по времени составлял 20 минут для всего 14-часового моделируемого интервала времени. Проанализировать такой большой массив данных (более миллиарда единиц информации) в рамках одной статьи трудно и нецелесообразно, поэтому были выбраны только наиболее существенные из них с точки зрения поставленной задачи: скорость и направление ветра, температура воздуха и радиационная температура в застройке, индекс биоклиматической комфортности PMV (Predicted Mean Vote)⁷. Графическая интерпретация расчетов в обобщенном виде представлена на рис. 7-9, 11 и в табл. 1.

Скорость движения и циркуляция воздуха

Анализируя влияние застройки на скорость ветра в целом (во всех узлах расчетного прямоугольника, расположенного на высоте 2 м, за исключением узлов, попадающих в габариты зданий) можно сказать, что при любом повороте застройки к фоновому северному ветру снижение его скорости в приземном слое составляет 70–80% (рис. 7). Считается, что типичная для современных городов застройка из отдельно стоящих зданий разной этажности снижает скорость ветра на 50-70% [16]. Таким образом, традиционная арабская застройка «сопротивляется» ветровому воздействию намного более активно. Характерно также, что в ней наблюдается существенная разница в дифференциации скорости и направления ветра внутри застройки в масштабе отдельных

⁵ CFD – Computational Fluid Dynamic.

⁶ Bruse D. Decoding Urban Nature. 2017. 25 pp. – URL: <https://www.envi-met.com/brochures/> (дата обращения: 15.08.2019).

⁷ Более подробно о параметре PMV см.: ГОСТ Р ИСО 7730-2009. Эргономика термальной среды. Аналитическое определение и интерпретация комфортности теплового режима с использованием расчета показателей PMV и PPD и критериев локального теплового комфорта.

домовладений и улиц – наиболее контрастно поле скорости ветра при ориентации застройки перпендикулярно внешнему ветру (рис. 7а), наименее контрастно – при повороте на 90° (рис. 7в). Это обстоятельство, как будет показано далее, очень важно с точки зрения потенциала аэрации отдельных участков застройки и естественной вентиляции внутренней среды зданий.

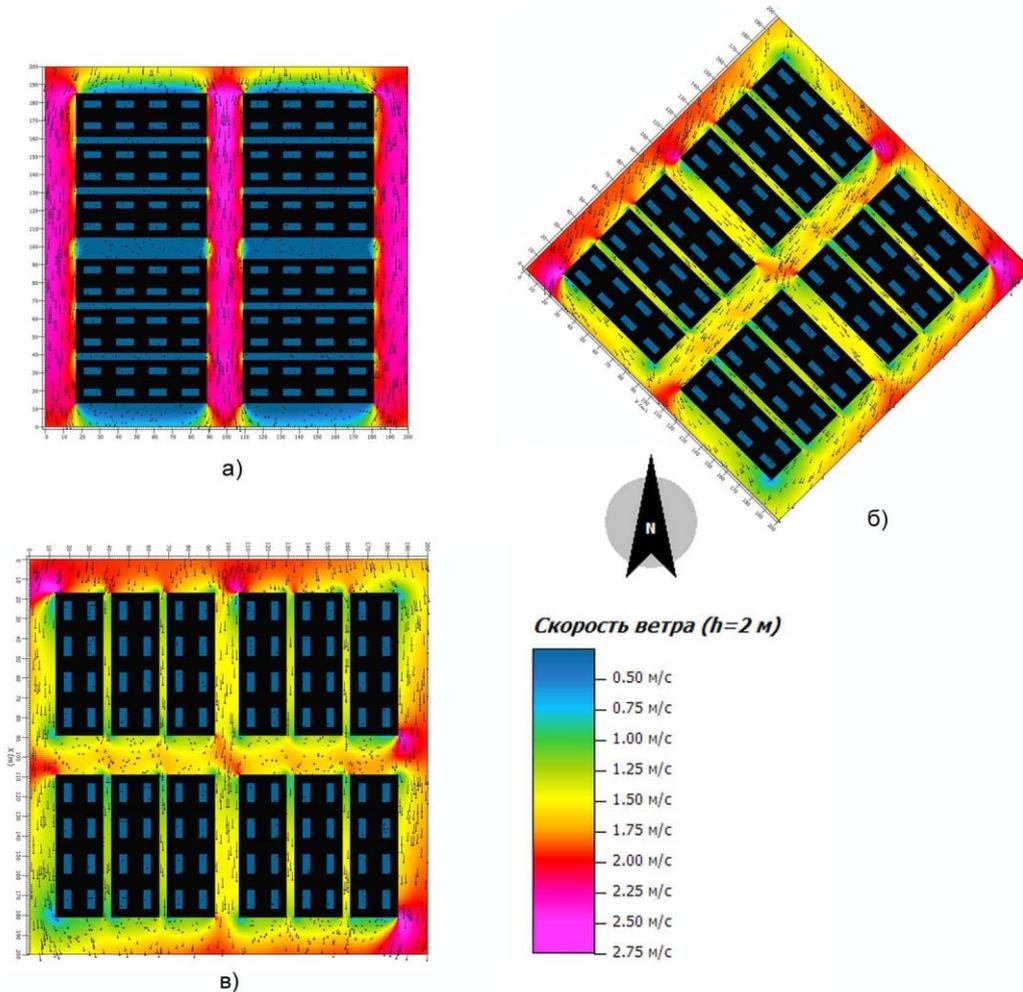


Рис. 7. Распределение скорости и направления ветра в предвечернее время в приземном слое застройки при разных углах экспозиции к внешнему потоку воздуха

В результате моделирования был воспроизведен суточный ход скорости ветра, также являющийся важным фактором, определяющим режим эксплуатации застройки. При высоких скоростях ветра и экстремально низких или высоких температурах создаются резко-дискомфортные условия для человека. Поэтому под суточный ход скорости ветра подстраивается население, выбирая для основных видов жизнедеятельности наиболее благоприятное время. В жарких странах это может быть раннее утро или поздний вечер. В полученном суточном ходе скорость ветра растет с 6 до 15-16 часов. Это происходит за счет интенсивного прогрева застройки и рельефа и усиления термической конвекции, которая «суммируется» с градиентным ветром. После 18 часов скорость ветра на всех высотах начинает понижаться. Разница минимальной (утренней) и максимальной (дневной) скоростей ветра составляет 1.5-2 раза (рис. 8а). Исходя из этого, далее для всех вариантов ориентации застройки анализируются характеристики ветра на 16 часов, как наиболее неблагоприятные с точки зрения биоклиматической комфортности.

Важной аэродинамической характеристикой застройки является «параметр шероховатости», определяющий характер изменения скорости ветра по вертикали – «вертикальный сдвиг» скорости. Параметр шероховатости застройки зависит от

плотности и высотной контрастности застройки, формы крыш, характера озеленения и т.д. Как правило, абсолютное значение этого параметра намного меньше высоты препятствий (зданий, сооружений, растительности) и практического интереса для данного исследования не представляет. Однако этот параметр влияет на то, как по вертикали изменяется скорость ветра в застройке и над ней и, соответственно, на воздухообмен приземного слоя воздуха со слоем воздуха, лежащим выше средней высоты застройки, что очень важно для аэрации территории застройки и естественной вентиляции внутренней среды зданий. Если этот вертикальный сдвиг выражен четко, значит, воздух внутри застройки, формирующий внутреннюю атмосферу застройки⁸ (ВАЗ) и слои атмосферы над застройкой обмениваются массой и энергией слабо, т.е. обеспечивается минимальная передача тепла и пылевого загрязнения из свободной атмосферы внутрь застройки. Это также говорит о том, что внешний поток воздуха воспринимает застройку как единое препятствие и «скользит» над ней почти не меняя скорости и направления. В рассматриваемом случае, когда внешний поток воздуха характеризуется высокой температурой и может нести частицы пыли и песка, такая ситуация является благоприятной. В связи с этим для всех трех вариантов ориентации застройки к ветру были рассчитаны средние скорости ветра на разных высотах – вертикальные профили скорости (рис. 8б). Расчеты показали, что наибольший вертикальный сдвиг скорости ветра соответствует ориентации застройки, в которой жилые улицы перпендикулярны потоку, наименьший сдвиг, наоборот – когда они параллельны фоновому ветру. Для ориентации застройки под углом 45° к ветру получены промежуточные значения.

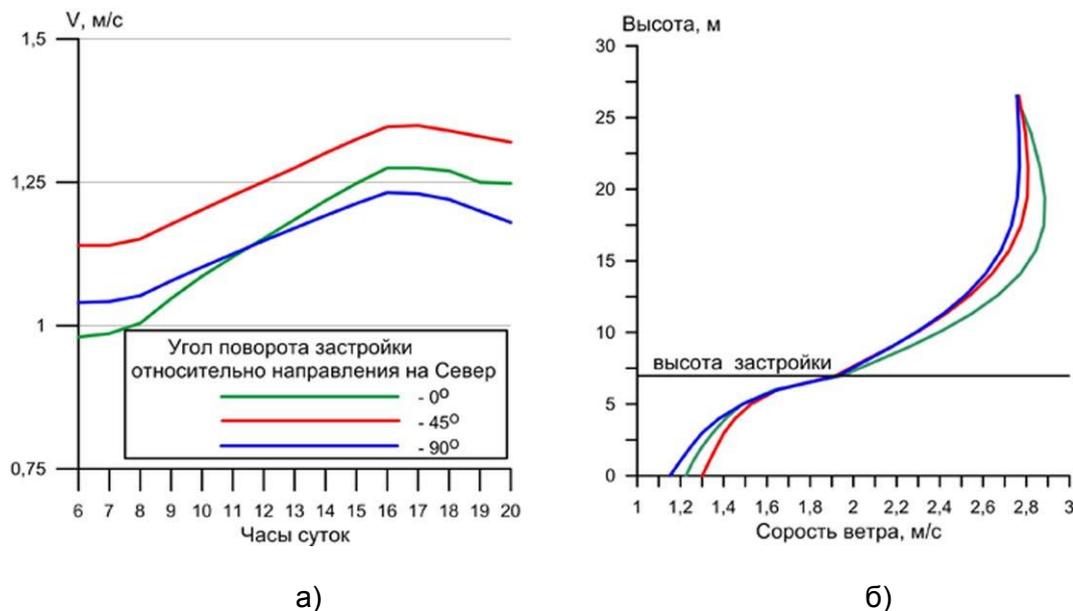


Рис. 8. Значение скорости ветра на территории застройки: а) суточный ход скорости на высоте 2 м; б) вертикальный профиль скорости ветра в 16 часов

В приземном слое суточный ход, характеризующийся разницей максимальных и минимальных в течение суток значений, лучше всего выражен при ориентации жилых улиц перпендикулярно фоновому ветру, утром скорость ветра здесь не превышает 0.8 м/с, днём она составляет около 1.3 м/с (рис. 8а). Максимальная скорость ветра в течение дня при минимальной суточной амплитуде скорости – всего 0.18 м/с – получена для застройки с ориентацией жилых улиц под углом 45° к фоновому ветру: утром скорость ветра составляет 1.15 м/с, днём – около 1.3 м/с.

Наибольший контраст скорости ветра по высоте днём возникает также при направлении жилых улиц перпендикулярно скорости фоновому ветру (рис. 8б). При такой ориентации

⁸ По международной терминологии – «*canopy layer*».

застройки скорость ветра в приземном слое на жилых улицах составляет не более 0.5 м/с. Такая скорость движения воздуха не вызывает раздражающего воздействия на слизистые глаз, практически не ощущается открытыми участками кожи, а пыли переносит не больше, чем при движении воздуха, возникающем при ходьбе человека. На общегородских улицах, параллельных фоновому ветру, его скорость составляет 2.0–2.5 м/с, т.е. близка к фоновой. При такой скорости может возникать пыление открытых грунтовых поверхностей, поэтому общегородские улицы традиционно имели мощение, в то время как жилые улицы, где скорость движения воздуха значительно ниже, могли оставаться без искусственных покрытий, для них было достаточно утоптанного за многие годы существования застройки глинистого грунта.

При любом повороте застройки к фоновому ветру вертикальный сдвиг скорости ветра уменьшается по сравнению с перпендикулярной ориентацией. Это говорит о том, что поворот застройки к ветру создает более благоприятные условия для проникновения внешнего воздуха в ВАЗ, вглубь улиц и, соответственно, домов и внутренних дворов. Характерно и весьма правдоподобно, что для всех вариантов поворота застройки к фоновому ветру скорость ветра достигает своих исходных фоновых значений примерно на одной и той же высоте – около 28 м, т.е. высоте, равной 4-кратной высоте застройки.

Таким образом, если говорить о пыле-ветрозащитных функциях традиционной арабской застройки в целом, то наилучшим образом они проявляются при ориентации жилых узких улиц и продольных осей внутренних дворов перпендикулярно неблагоприятному направлению ветра. При такой ориентации ветер воспринимает застройку как единый массив и плавно обтекает его сверху, практически не обмениваясь порциями воздуха (перегретого, содержащего пыль и песок) с ВАЗ.

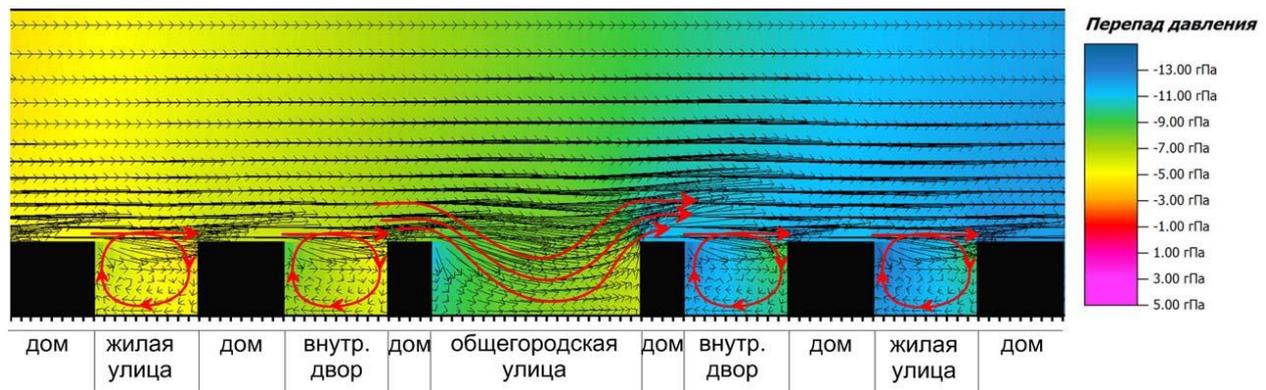
Если рассматривать ориентацию застройки с противоположной позиции – обеспечения максимальной аэрации ветрами благоприятных направлений – то предпочтительна ориентация жилых улиц параллельно этим направлениям ветра. Такая ориентация улиц, пропускающая потоки воздуха вглубь застройки, часто встречается в арабских городах, расположенных у подножия склонов гор и возвышенностей. Ночью вниз по склонам дует кatabатический ветер, несущий прохладный чистый воздух с верхней части склонов. Этот воздух может проникать далеко вглубь застройки по каналам улиц, принося порции свежего воздуха и забирая избыточное тепло, накопленное в дневные часы.

Контраст скорости ветра в приземном слое и над кровлями зданий является очень важным фактором, обеспечивающим в любом морфотипе застройки естественную вентиляцию внутренней среды зданий и аэрацию внутренних дворов. Она возникает за счет перепадов давления, создаваемых при торможении и ускорении потоков воздуха при обтекании зданий по принципу Бернулли⁹. Так, например, внутри зданий, во внутренних дворах и на узких жилых улицах скорость ветра ниже, чем на широких общегородских улицах и в слое воздуха, расположенном выше застройки. Следовательно, давление воздуха над зданиями ниже, чем внутри зданий или на жилых улицах (рис. 9а). Этот градиент давления служит силой, побуждающей воздух перетекать с узких жилых улиц внутрь зданий, а оттуда – во внутренние дворы и далее вверх, в вышележащие слои воздуха.

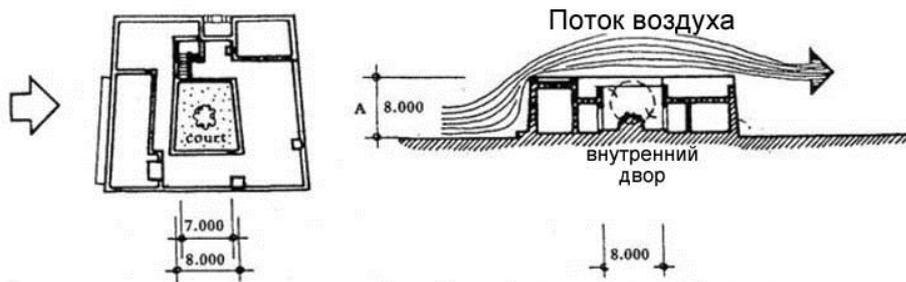
Кроме того, движение воздуха в полузамкнутых объемах узких жилых улиц и внутренних дворов также обеспечивается за счет динамического трения воздуха на верхней грани этих объемов и воздуха, относительно свободно движущегося с большей скоростью над застройкой (рис. 9б). На рис. 9а красными стрелками показаны возникающие за счет этого полузамкнутые микроциркуляционные ячейки во внутренних дворах и в «каналах» узких жилых улиц. Движение воздуха в них показано маленькими черными стрелками – это

⁹ Принцип, впервые высказанный Даниилом Бернулли в 1726 г., гласит: в струе воды или воздуха давление велико, если скорость мала, и давление мало, если скорость велика (Я.И. Перельман «Занимательная физика», кн. 2)

векторы скорости, рассчитанные моделью ENVI-met, длина стрелок пропорциональна скорости движения воздуха в плоскости разреза. Важно, что при этом воздухообмен, а, следовательно, и обмен пылью и избыточным теплом между наружным воздухом и ВАЗ минимален, т.е. за счет своей плотности застройка эффективно «защищается» от пылевветрового воздействия. На этом же рисунке показана ещё одна воспроизведенная моделью особенность микроциркуляции – на широких общегородских улицах не возникает полузамкнутых микроциркуляционных ячеек, как, например, во внутренних дворах. Эти более широкие улицы, как показано красными стрелками, беспрепятственно продуваются фоновым ветром даже в поперечном направлении, а в уличное пространство попадает переносимая этим ветром пыль и избыточное тепло.



а)



б)

Рис. 9. Циркуляция воздуха в застройке: а) вертикальный разрез полей давления и скорости ветра для фрагмента застройки (пояснения см. в тексте); б) полузамкнутые микроциркуляционные ячейки во внутренних дворах¹⁰

В некоторых арабских странах с континентальным тропическим климатом, расположенных на возвышенностях, в зимнее время наблюдаются относительно низкие среднесуточные температуры (с учетом того, что в домах не предусмотрено отопление) – +12...+15°C. Это дополнительно вызывает необходимость ограничения воздухообмена между воздухом внутри застройки и внешним по отношению к застройке, охлаждающим ее ветровым потоком. Для этого, например, в традиционной архитектуре Ирана используются купольные покрытия центральных пространств домовладений – «соффе» – центральные залы под куполом, которые по своим функциям являются их внутренними дворами [17]. Характерно, что в конструкции куполов предусматриваются два отверстия – в верхней части купола и внизу, как правило с наветренной части (рис. 10). Здесь для побуждения естественной вентиляции зданий также используется принцип Бернулли. При обтекании купола поток воздуха ускоряется, максимальная скорость наблюдается над верхней частью купола, там же наблюдается его минимальное давление (рис. 10а).

¹⁰ https://www.researchgate.net/figure/Airflow-in-a-traditional-courtyard-Mabrouk-2006_fig6_265702212

Минимальная скорость движения воздуха и максимальное давление – внутри здания, в нижней части с наветренной стороны купола, у дополнительного проема – промежуточные значения скорости и давления. При необходимости обеспечить максимальную вентиляцию внутренней среды, отверстие в нижней части купола закрывается. Это побуждает воздух проникать внутрь здания через светопроемы в стенах, а потом он вытягивается за счет перепада давления P_1-P_2 через отверстие в верхней части купола. Если отверстие в нижней части купола открыто, то вентилируется только подкупольное пространство за счет перепада давления P_3-P_2 , а во внутреннюю среду здания наружного воздуха попадает мало. Так делается при неблагоприятных погодных условиях – либо в прохладную погоду, либо в слишком жаркую погоду, когда конструкция купола нуждается в обдувании с внутренней и наружной сторон для снижения ее температуры, повышающейся из-за избыточного количества солнечной радиации.

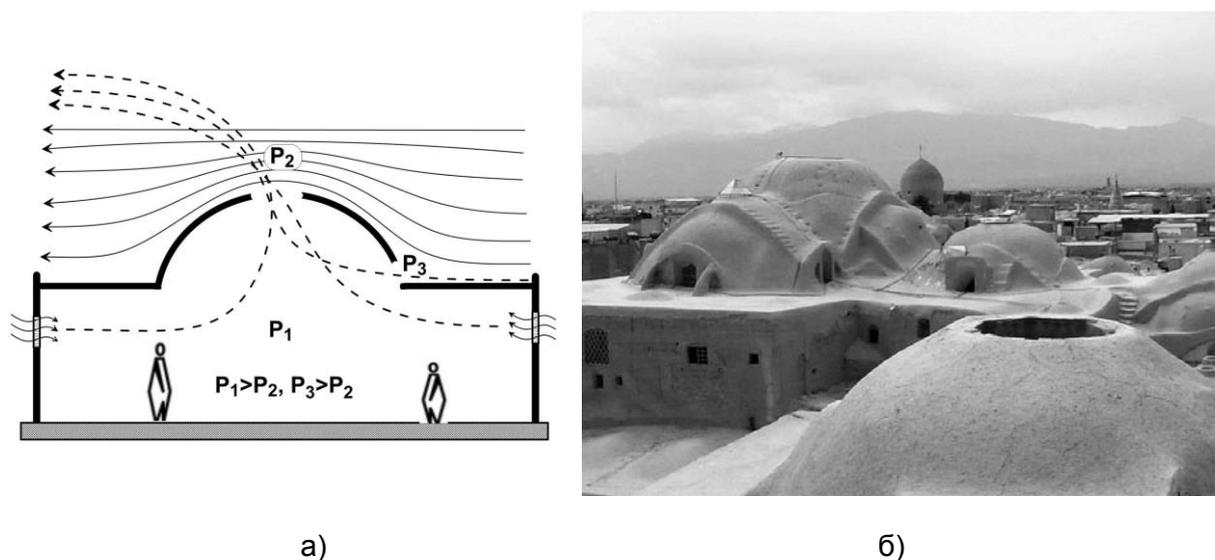


Рис. 10. Работа купольных перекрытий при обеспечении естественной вентиляции зданий: а) принцип Бернулли (пояснения см. в тексте); б) историческая застройка в г. Исфахан, Иран (по [17])

Все отверстия в куполе также обеспечивают внутреннее пространство естественным освещением. В связи с этим многие архитекторы ошибочно объясняют устройство этих отверстий именно функциями освещения, недооценивая их работу по естественной вентиляции и на основании этого вынося рекомендации по их остеклению. В этой связи важно также отметить, что стихийная «модернизация» населением традиционных домовладений, наблюдающаяся сейчас во многих арабских странах и заключающаяся в перекрытии внутренних дворов воздухонепроницаемыми (хотя и светопропускающими) плоскими кровлями, резко ухудшает биоклиматическую комфортность внутренней среды. Такая «модернизация» в последующем требует установки кондиционеров и систем вентиляции с механическим побуждением, т.е. дополнительных затрат энергии и материальных ресурсов. В связи с этим можно порекомендовать при перекрытии дворов и установке сплит-систем придерживаться двух правил: перекрытия делать в куполообразном или пирамидальном исполнении, оставляя отверстие в верхней части, а внешние блоки кондиционеров устанавливать на кровлях с подветренной стороны по отношению к перегревным направлениям ветра. Рекомендуется также внутри перекрываемых дворов использовать вентиляторы для перемешивания воздуха. Они создают более значительные скорости движения воздуха и взмучивают пыль, которая при неподвижном воздухе не удаляется.

Температура воздуха и тепловое излучение

Тепловой режим застройки определяется ее тепловым балансом. Основной приходной частью теплового баланса являются солнечная радиация и тепло, приносимое в застройку с внешними потоками воздуха. Для стран с сухим жарким климатом основная приходная часть теплового баланса в течение года – именно поглощение солнечной радиации, вторая приходная часть играет заметную роль только при неблагоприятных погодных условиях, когда на территорию застройки приносится перегретый воздух извне. Тепловой режим любой среды с точки зрения биоклиматической комфортности характеризуется значениями и сочетанием температуры воздуха и радиационной температуры. Поэтому следующим аспектом, который будет рассмотрен в контексте биоклиматической комфортности традиционной арабской застройки – это температура воздуха и радиационная температура, определяемая температурой поверхностей в застройке (рельеф, стены, кровли). С этой целью далее будет рассмотрен суточный ход значений температуры воздуха и радиационной температуры на высоте 2 м в характерных точках обитаемого пешеходного пространства застройки – «точках наблюдения» (рис. 6): внутренних дворах, на узких жилых улицах, широких общегородских улицах и на их пересечении, образующем в модели застройки «площадь». Параметры тепловой среды, та же как и параметры движения воздуха, будут рассмотрены для трех вариантов ориентации застройки по сторонам горизонта, а, следовательно, и к солнечному излучению: узкие жилые улицы ориентированы по широте, под углом 45° к широте и перпендикулярно ей, т.е в направлении север–юг.

Температура приземного слоя воздуха в застройке имеет хорошо выраженный суточный ход во всех трех вариантах расчета (рис. 11). Примерно через час после восхода солнца она начинает резко расти, достигая максимальных значений в 13:40-14:00, примерно через 2 часа после солнечного полудня. Далее следует ее снижение, которое длится до утра следующих суток. В первые часы температура воздуха понижается довольно быстро, потом это понижение становится менее интенсивным. Характерно, что температура имеет почти синхронный суточный ход во всех вариантах расчета.

Дневные максимумы температуры имеют некоторые различия как для отдельных участков застройки в одних и тех же вариантах расчета, так и для разных расчетов. Общим является только то, что во всех вариантах максимум температуры воздуха имеет наименьшие значения во внутренних дворах, незначительно выше он на узких жилых улицах, а максимальные значения получены для «площади» на пересечении двух широких общегородских улиц. Различие в максимальных значениях температуры между внутренними дворами и площадью составляет около 1°C . Это говорит о том, что воздух за счет своей подвижности, стимулируемой внешним ветром и термической конвекцией, перемешивается достаточно активно, за счет этого температурные контрасты на территории застройки сглаживаются. При неподвижном воздухе они были бы выражены гораздо более резко. Различия в температуре воздуха для различных вариантов застройки укладываются в пределы 1°C . Так, например, при ориентации жилых улиц по широте максимальная в суточном ходе температура воздуха во внутренних дворах составляет $32,7^\circ\text{C}$, при угле поворота 45° – $31,9^\circ\text{C}$, при ориентации их по меридиану – $31,8^\circ$. Примерно такие же по величине различия в максимальной температуре при разных вариантах ориентации застройки получены и для других участков застройки (табл. 1).

Отсюда следует, что температура на одних и тех же участках застройки при ее различной ориентации меняется незначительно, в пределах 1°C , что не может являться причиной существенных различий биоклиматической комфортности. Расчетный суточный ход показывает другую, более важную характеристику внутрисуточной динамики температуры – период превышения ею отметки 32°C , являющейся критической с точки зрения биоклиматической комфортности – при температуре выше этого значения любой ветер вреден для человека. Это связано с тем, что максимальная средняя температура поверхности кожи человека, не вызывающая чрезмерного напряжения физиологических механизмов терморегуляции, составляет именно 32°C . Таким образом, если температура

воздуха становится выше, то его движение вблизи открытых участков кожи не ведет к снижению перегрева, а наоборот – нагревает тело ещё больше, что приводит к перегреву, а при низкой влажности воздуха и к обезвоживанию организма при длительном воздействии этого фактора. Поэтому важно отметить, что период суток с температурой воздуха во внутренних дворах 32°C и выше имеет большую продолжительность при ориентации длинной стороны этих дворов по широте – с 09:40 до 18:00. Наименьшую продолжительность этот период имеет при ориентации внутренних дворов по меридиану – с 10:20 до 17:40, т.е. на 1 час меньше.

Средняя радиационная температура зависит от степени нагрева поверхностей застройки (кровли, фасады, покрытие улиц) и определяется радиационным балансом этих поверхностей, который, в свою очередь, определяется ориентацией этих поверхностей по отношению к солнцу и временем экспозиции к прямой солнечной радиации. Как видно из результатов расчетов, амплитуда изменения средней радиационной температуры застройки гораздо больше амплитуды температуры воздуха. Максимальные значения радиационной температуры в течение дня могут достигать 85°C на открытых пространствах и опускаться ниже 20°C в ночные часы, т.е. принимать значения даже несколько ниже, чем температура воздуха.

Внутрисуточный ход средней радиационной температуры имеет ещё одну важную особенность – наличие двух максимумов. Первый максимум наблюдается с 8 до 12 часов дня (в зависимости от участка застройки), второй – в 14–16 часов. Значения радиационной температуры в первом максимуме заметно (примерно на $8\text{--}10^{\circ}$) ниже, чем во втором. Для открытых пространств застройки (широкие улицы, площади) формирование первого максимума связано с тем, что в 12-14 часов достигает своего максимального развития термическая конвекция, при этом усиление ветра на этих достаточно хорошо аэрируемых участках застройки приводит к активизации молекулярного и конвективного теплообмена, временно прерывающего рост радиационной температуры городской среды. Для ограниченно аэрируемых участков (узкие улицы, внутренние дворы) этот промежуточный минимум радиационной температуры в послеполуденные часы также связан с фактором взаимозатенения зданий и внутривортовых пространств.

Абсолютные значения радиационной температуры имеют намного более значимые различия как для различных участков застройки внутри одного и того же варианта расчета, так и между разными вариантами ориентации застройки. Средняя за день радиационная температура во всех вариантах расчетов имеет минимальное значение во внутривортовых пространствах, т.к. эти пространства имеют максимальную степень затенения, немного выше радиационная температура на узких жилых улицах, а максимальное значение во всех вариантах получено для открытого пространства площади на пересечении широких улиц. Если сравнить средние за день значения радиационной температуры для разных вариантов, то окажется, что для всех участков застройки максимальные значения получаются в варианте, где длинные стороны дворов и жилые улицы ориентированы по широте; минимальные значения – в варианте их ориентации по меридиану. Это также связано с условиями инсоляции. В первом случае время экспозиции стен внутренних дворов и поверхности улиц к прямой радиации намного больше, чем во втором. Исключение составляет только площадь, где радиационная температура в первом варианте несколько ниже, чем в остальных двух.

С точки зрения биоклиматической комфортности первостепенное значение имеет радиационная температура во внутренних дворах и на жилых улицах, где люди вынуждены находиться в течение всего дня. Остальными участками застройки население в наиболее жаркие часы может не пользоваться. Поэтому сравним значения радиационной температуры на указанных участках для различных вариантов ориентации застройки. В варианте, где длинные стороны дворов и жилые улицы ориентированы по широте, средние за день значения радиационной температуры составляют: во дворах – $52,8^{\circ}\text{C}$, на улицах – $60,1^{\circ}\text{C}$. При ориентации этих элементов пространства по меридиану

значения радиационной температуры составляют: во дворах – 45,5°С, на улицах – 44,1°С. Т.е. различия радиационной температуры составляют 7–8°С, что гораздо больше различий в температуре воздуха и уже весьма ощутимо с точки зрения биоклиматической комфортности. Эти различия связаны с двумя факторами: временем экспозиции к прямой солнечной радиации вертикальных и горизонтальных поверхностей в застройке, а также с углом падения¹¹ солнечных лучей на эти поверхности.

Как известно [16], отражающая способность большинства естественных и искусственных поверхностей зависит от угла падения лучей. Чем угол падения меньше, тем меньше и отражательная способность, т.е. тем бóльшая доля солнечной радиации поглощается поверхностью. Наименьший угол падения солнечных лучей для вертикальных поверхностей (фасадов) наблюдается в утренние и вечерние часы, для поверхности рельефа (улиц, площадей) – в околополуденные часы. Этим, например, объясняется тот факт, что наименьшей радиационно-тепловой нагрузке подвергаются здания в форме параллелепипеда, если его длинная сторона ориентирована по направлению запад–восток [5]. В противоположность этому, внутренние поверхности такого параллелепипеда (если он полый и не имеет верхней грани) получают максимальную радиационную тепловую нагрузку. Такими полыми параллелепипедами, имеющими только боковые и нижнюю грани, и являются внутренние дворы. Если эти дворы переориентировать вытянутой стороной по направлению север–юг, то они будут получать наименьшую возможную радиационно-тепловую нагрузку. То же касается и уличного пространства. Этим объясняется то, что при ориентации внутренних дворов и жилых улиц в модели по широте в них наблюдаются наибольшие значения радиационной температуры и наоборот. Для широких общегородских улиц указанная закономерность также справедлива, однако на открытых широких пространствах она проявляется в меньшей степени, что подтверждается результатами выполненного нами численного эксперимента.

Биоклиматическая комфортность и эргономика

Изучение *индекса биоклиматической комфортности PMV* – основная цель настоящего исследования. Значение этого индекса, кроме скорости ветра, температуры и влажности воздуха и радиационно-теплого баланса, зависит от двигательной активности и теплоизоляционных свойств одежды. Уровень метаболической активности при определении значения показателя PMV принимался согласно стандарту ГОСТ Р ИСО 7730-2009: для внутренней среды зданий и внутренних дворов 1 met¹², для людей, находящихся на улицах – 1.6 met. Степень одетости, соответственно – 1 и 1.3 clo¹³. С учетом этих параметров, а также микроклиматических показателей были рассчитаны значения показателя PMV в течение расчетного периода для различных участков застройки при ее различной ориентации по сторонам горизонта.

В суточном ходе для всех вариантов расчета и всех участков городской застройки индекс PMV имеет один максимум, по времени, почти совпадающий с максимумом радиационной температуры, но наблюдающийся примерно на 30–40 минут раньше, т.е. в какой-то степени он тяготеет к послеполуденному пику температуры атмосферного воздуха. Наиболее высокие значения индекса PMV получены для всех участков застройки при ориентации жилых улиц по широте (рис. 11а). Среднее значение этого индекса при такой ориентации застройки составило для внутренних дворов – 2,3, жилых улиц – 2,9, широких улиц и площади – более 3,0, что соответствует резкому биоклиматическому дискомфорту со стороны перегрева. Наиболее оптимальные показатели PMV получены при ориентации жилых улиц и длинных сторон внутренних дворов по меридиану (рис. 11в). Для этой ситуации значение индекса составило: для внутренних дворов – 1,9, жилых улиц

¹¹ Важно помнить, что угол падения – это угол между лучом падающей волны и нормалью к поверхности раздела сред (фасадам, поверхности рельефа и т.д.).

¹² 1 met = 58 Вт/м² поверхности тела.

¹³ 1 clo = 0.155°С×м²/Вт.

– 2,2, широких улиц – 3,2, площади – 3,6. При этом существенно сократилась продолжительность резко дискомфортного периода (PMV>3). Если при первом варианте во внутривортовых пространствах перегрев может ощущаться в течение почти 6 часов, а на жилых улицах – более 7 часов, то при ориентации улиц с севера на юг это время уменьшается, соответственно, до 2 ч. 40 мин. и 3,5 часов (табл. 1). Сравнивая суточный ход температуры воздуха, радиационной температуры и индекса PMV можно сделать вывод, что последний, зависит в первую очередь от радиационной температуры.

Таблица 1. Средние значения микроклиматических параметров и биоклиматической комфортности при разных ориентациях модели по сторонам горизонта

Ориентация застройки	Территория	Температура воздуха (°C)	Радиационная температура (°C)	Индекс PMV	Начало перегрева ¹⁴ (чч:мм)	Окончание перегрева (чч:мм)	Продолжительность дискомфортного периода суток (чч:мм)
Жилые улицы параллельно широте (рис. 11а)	Внутренние дворы	32,7	52,8	2,3	09:40	15:30	05:50
	Жилые улицы	32,7	60,1	2,9	08:20	16:00	07:20
	Общегородские улицы	33,3	61,5	3,6	07:40	17:30	09:50
	Центральная площадь	33,6	62,3	3,6	07:20	17:40	10:20
Жилые улицы под углом 45° к широте (рис. 11б)	Внутренние дворы	31,9	47,6	2,0	10:30	14:30	4:00
	Жилые улицы	31,8	46,2	2,4	10:00	15:00	05:00
	Общегородские улицы	32,4	60,0	3,4	08:30	17:30	09:00
	Центральная площадь	32,5	62,9	3,4	07:30	17:40	10:10
Жилые улицы по меридиану (рис. 11в)	Внутренние дворы	31,8	45,5	1,9	10:50	13:30	02:40
	Жилые улицы	3,7	44,1	2,2	10:30	14:00	03:30
	Общегородские улицы	32,5	60,0	3,2	08:30	17:10	08:40
	Центральная площадь	32,9	64,5	3,6	07:20	17:40	10:20

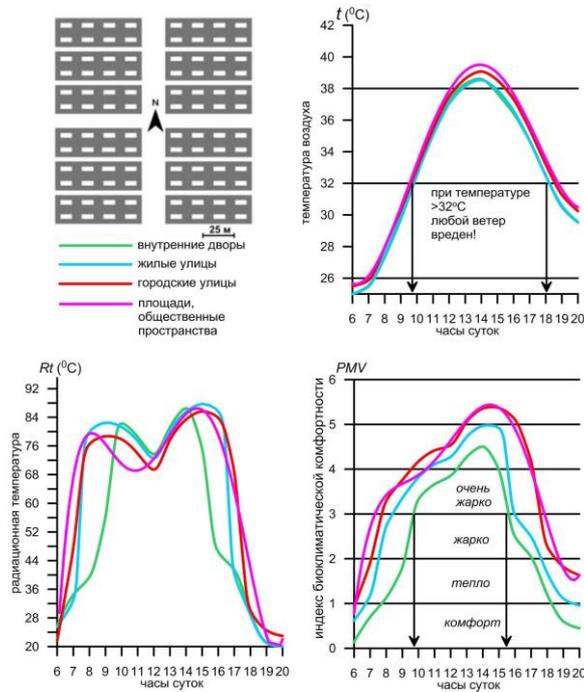
Относительно более комфортные условия во внутривортовых пространствах и на узких улицах объясняются ещё и тем, что на этих участках существенно снижается время экспозиции к прямым солнечным лучам. Утром и вечером солнце освещает только верхние части, соответственно, восточных и западных стен, окружающих дворы и проникает вглубь дворов только в короткий околополуденный промежуток времени. При ориентации дворов вытянутой стороной по широте стоящее высоко солнце проникает вглубь дворов на более длительный промежуток времени как раз в околополуденные часы, в период максимальной инсоляции, что создает большую радиационно-тепловую нагрузку на пространство дворов, о чем уже говорилось выше. То же относится и к узким жилым улицам.

На широких общегородских улицах и площадях в связи с большим фактором видимости неба¹⁵ радиационно-тепловая нагрузка при любых ориентациях застройки выше, что делает их более подверженными перегреву, чем узкие пространства. Для этих участков

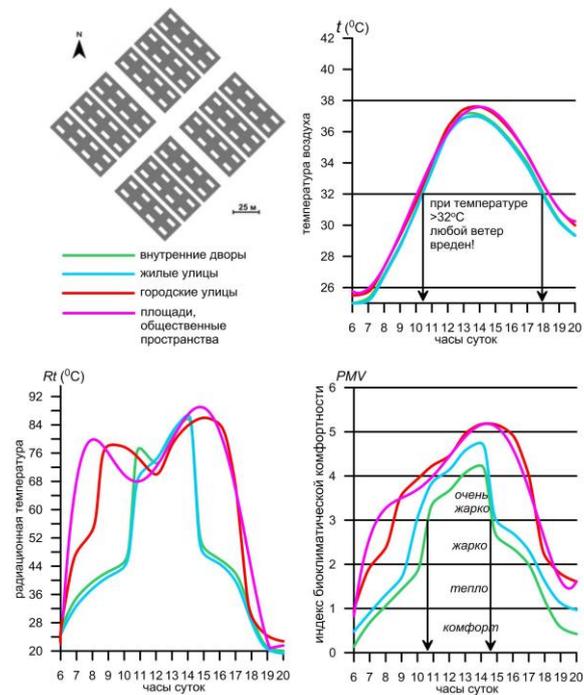
¹⁴ За начало периода перегрева принимается время превышения индексом PMV значения 3.0, окончание перегрева – понижение до значения 3.0 и менее.

¹⁵ По международной терминологии – «sky view factor»

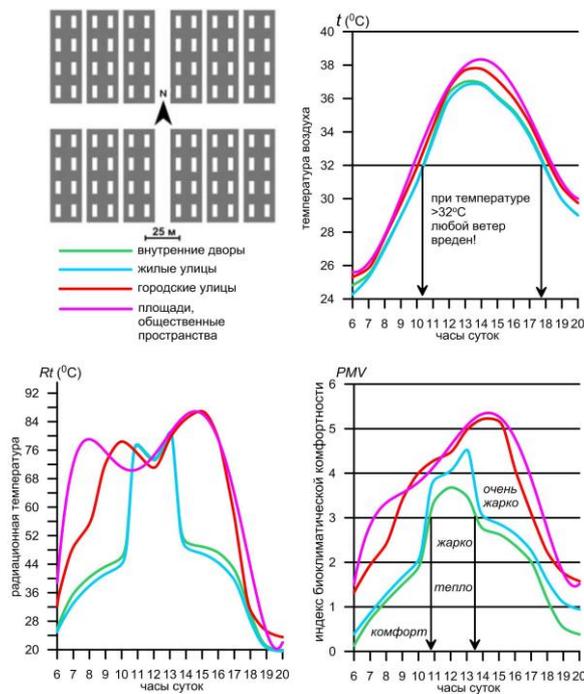
среднее за день значение индекса PMV при любой ориентации застройки превышает критическое значение 3,0. Однако в пределах этих улиц значение индекса биоклиматической комфортности варьируется в зависимости от затененности их сторон фронтом застройки и, соответственно, времени суток. Наименее дискомфортными являются участки, не затеняемые в тот или иной период. Например, утром наименее дискомфортны восточные стороны улиц, ориентированных по направлению север–юг, вечером – их западные стороны. Южная сторона у широтных улиц в течение всего дня комфортнее, чем северная сторона, облучаемая прямой солнечной радиацией. С учетом этого может быть организован режим эксплуатации общегородских улиц для целей, например, уличной торговли.



a)



b)



в)

Рис. 11. Параметры микроклимата и биоклиматической комфортности при различных ориентациях застройки: а) жилые улицы по широте; б) жилые улицы под углом 45° к широте; в) жилые улицы по меридиану

Выводы

Выполненное численное моделирование микроклиматического режима традиционной арабской застройки в условиях жаркого сухого климата позволяет сделать несколько выводов о ее механизмах защиты от неблагоприятных климатических условиях и степени обеспечения биоклиматической комфортности пассивными архитектурно-планировочными методами.

Для защиты от пылеветрового воздействия традиционная арабская застройка создает систему микроциркуляционных механизмов, обеспечивающих относительную биоклиматическую комфортность при воздействии перегретого и/или пыленесущего ветра. Эта система работает только при совокупном взаимодействии всех механизмов: аэродинамического сопротивления городской среды, динамической и термической конвекции на общегородских широких, жилых узких улицах, микроциркуляции воздуха во внутривортовых пространствах. Нарушение в процессе «модификации» любого из микроциркуляционных механизмов приводит к нарушению работы всей системы в целом.

Аналогично, функции гелиотермической защиты (от избыточного радиационно-теплового воздействия солнечной радиации) выполняются всеми элементами застройки одновременно. При этом для отдельных участков может наблюдаться снижение теплового комфорта с целью его повышения на других участках, более интенсивно используемых населением.

Большое значение имеет ориентация внутренних дворов, жилых и общегородских улиц. Она может быть направлена как на защиту от избыточной инсоляции, так и на регулирование аэрационного режима городской среды. При определенных условиях – направление преобладающего неблагоприятного ветра по меридиану, или направление благоприятного ветра, несущего чистый прохладный воздух по широте – застройка может одновременно выполнять и аэро- и гелиозащитную функции (рис. 12).

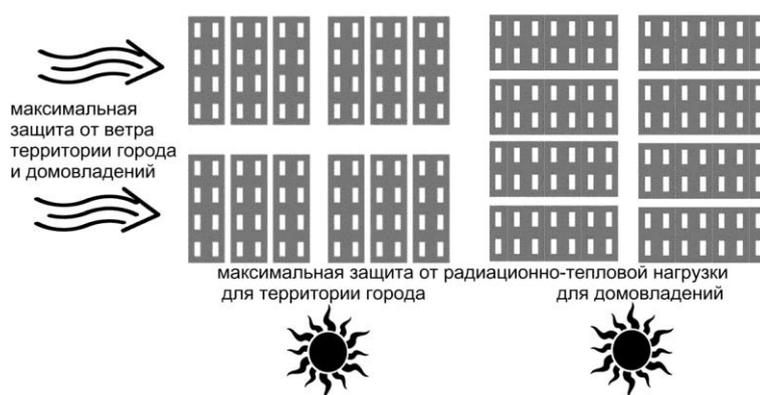


Рис. 12. Планировка и ориентация застройки в зависимости от выполнения ею функций по защите от пылеветрового и/или радиационно-теплого воздействия

При наиболее неблагоприятных погодных условиях, которые закладывались в качестве начальных и граничных условий в день летнего солнцестояния, наиболее неблагоприятного с точки зрения радиационно-тепловой нагрузки, при любой ориентации застройки может наблюдаться сильный перегрев на всех её участках. В связи с этим для стран с жарким сухим типом климата традиционно характерен суточный ритм жизни, пики активности при котором приходятся на утренние или вечерние часы. Остальное время люди предпочитают оставаться внутри закрытых помещений, используя тепловую инерцию стен и пола, который, как правило, устраивался в термодинамической связи с подстилающими грунтами. В результате этого избыточное тепло усваивается днём и отдается обратно в помещения ночью или в прохладную погоду.

Ввиду того, что в бытовой практике население стремится модернизировать историческую застройку с целью улучшения ее биоклиматической комфортности, необходимо строго придерживаться традиционных приемов и методов, выработанных в конкретной местности с учетом ее географической широты (высоты солнца), орографии, доступности водных ресурсов, строительных материалов и т.д. Вся модернизация должна проводиться с учетом заложенных в традиционные приемы планировки и застройки микроклиматических механизмов, поскольку нарушение одного из них «выводит из строя» всю систему и ведет к удорожанию строительства.

Озеленение городской территории и отдельных внутренних дворов не всегда целесообразно, т.к. может препятствовать аэрации территории застройки и естественной вентиляции зданий и внутренних дворов. Кроме того – акклиматизированные растения могут создавать тень, но в силу свойственных им физиологических особенностей мало увлажняют воздух. Поэтому лучше применять открытые бассейны и фонтаны, грунтовые теплообменники с увлажнением и механическим побуждением. Побуждение можно устраивать в верхнем отверстии купола, если внутренний двор перекрыт куполом и есть возможность изолированного режима эксплуатации помещений, или в канале приточной системы общеобменной вентиляции со стороны воздухозабора, который лучше всего делать со стороны улицы. Такие системы с естественным побуждением широко применяются в традиционной архитектуре [18], как и с ветровые башни-«бадгиры».

Европейская застройка, сформировавшаяся в намного более комфортном и благоприятном типе климата, не обладает всеми этими свойствами, ее перенос в условия тропического континентального аридного климата приведет к резкому дискомфорту городской среды и внутренней среды зданий, который может быть компенсирован только за счет довольно значительных затрат материальных ресурсов на климатическое оборудование и энергетических ресурсов на его постоянную работу. Такая архитектурно-градостроительная практика не может быть признана «зеленой» или «устойчивой», даже

если на покрытие возрастающих потребностей используется энергия возобновляемых источников, например – солнечных или ветровых электростанций

Источники иллюстраций

Рис. 1. <https://hightech.fm/2018/12/18/dubai-earth>.

Рис. 2. по [9].

Рис. 3. изображения по «Google Earth».

Рис. 4. по [11].

Рис. 5. по [9] в авторской интерпретации.

Рис. 6-8. рисунки автора.

Рис. 9а. рисунок автора.

Рис. 9б. https://www.researchgate.net/figure/Airflow-in-a-traditional-courtyard-Mabrouk-2006_fig6_265702212

Рис. 10а. рисунок автора.

Рис. 10б. по [17].

Рис. 11-12. рисунки автора.

Литература

1. Al-Ragam A. Presentation and ideology in postcolonial urban development: the Arabian Gulf // *Journal of Architecture*. – 2011. – 16(4). – p. 455–469.
2. Basam Behsh. The Traditional Arabic House. Its Historical Roots // *Tidskeift för Arkitekturforskning*. – Vol. 1. – 1988. – № 4. – p. 16-30.
3. Sarah Khalil Elmasry. Islamic Architecture in Dubai: Renewal and contemporaneity. *WIT Transactions on The Built Environment*, Vol 177. Islamic Heritage Architecture and Art II. – 2018. – p. 221-231.
4. Givoni B. *Climate Consideration in Building and Urban Design*. – New York: John Wiley & Sons inc, 1997. – 464 p.
5. Olgyay V. *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism: New and Expanded Edition*. – New Jersey, USA: Prienston University Press, 2015. – 190 p.
6. Brown G.Z., DeKay M. *Sun, Wind, and Light: Architectural Design Strategies (Revised Ed.)* – New York. John Wiley & Sons, 2014. – 414 p.
7. Croome D. The determinants of architectural form in modern buildings within the Arab world. *Building and Environment*. – 1991. – №26(4). – p. 349–362.
8. Hobbs J. Heritage in the lived environment of the United Arab Emirates and the gulf region. *International Journal of Architectural Research*. – 2017. – №2. – p. 55–82.
9. Almhrej, Majid Ibrahim A *Design Guide for Contemporary Saudi Arabian Homes in Riyadh*. Doctoral thesis. – Newcastle, UK: Northumbria University, 2015. – 290 p.
10. AlZubaidi, Maha Sabah Salman. *The sustainability potential of traditional architecture in the Arab world with reference to domestic buildings in the UAE*. Doctoral thesis, University of Huddersfield, 2007. – 393 p.
11. Ahmadreza Foruzanmehr. *Thermal Comfort in Hot Dry Climates. Traditional Dwellings in Iran* / Routledge, UA, 2018. – 210 p.

12. Rapoport A. The Nature of the Courtyard House: A Conceptual Analysis // Traditional Dwellings and Settlements Review. – Vol. 18. – №2 (SPRING 2007). – p. 57-72.
13. Moustapha A., Costa F. and Nobel A. Urban development in Saudi Arabia: building and subdivision codes. Butterworth & Co Limited. – 1985. – №2(2). – p. 140-148.
14. Fazia Ali-Toudert, Moussadek Djenane, Rafik Bensalem, Helmut Mayer. Outdoor thermal comfort in the old desert city of Beni-Isguen, Algeria // CLIMATE RESEARCH. – 2005. – Vol. 28. – p. 243–256.
15. Grimmond C.S.B. Progress in measuring and observing the urban atmosphere // Theoretical and Applied Climatology. – 2006. – Vol. 84. – №.1-3. – p. 3-22.
16. Мягков М.С., Губернский Ю.Д., Конова Л.И., Лицкевич В.К. Город, архитектура, человек и климат / под ред. М.С. Мягкова. – Москва: «Архитектура-С», 2007. – 344 с.
17. Эйса Задех Сепехр. Традиционное городское жилище в исторических городах Ирана. // Architecture and Modern Information Technologies. № 2(15) 2011. с. 101-119. – URL: <https://marhi.ru/AMIT/2011/2kvart11/eisa/eisa.pdf>
18. Юсифи Р.А., Забалуева Т.Р. Традиции арабской архитектуры в современных зданиях. // Architecture and Modern Information Technologies. –2017. – №2(39). – С. 239-254. – URL: https://marhi.ru/AMIT/2017/2kvart17/PDF/19_AMIT_39_ZABALUEVA_YOUSFI_PDF.pdf

References

1. Al-Ragam A. Presentation and ideology in postcolonial urban development: the Arabian Gulf. The Journal of Architecture, 2011, 16(4), pp. 455–469.
2. Basam Behsh. The Traditional Arabic House. Its Historical Roots. Tidskeift för Arkitekturforskning. 1988, vol. 1, no. 4, pp. 16-30.
3. Sarah Khalil Elmasry. Islamic Architecture in Dubai: Renewal and contemporaneity. WIT Transactions on The Built Environment, Vol 177. Islamic Heritage Architecture and Art II. 2018, pp. 221-231.
4. Givoni B. Climate Consideration in Building and Urban Design. New York. John Wiley & Sons inc, 1997, 464 p.
5. Olgay V. Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism: New and Expanded Edition. Princeton University Press, New Jersey, USA, 2015, 190 pp.
6. Brown G.Z., DeKay M. Sun, Wind, and Light: Architectural Design Strategies (Revised Ed.) New York. John Wiley & Sons, 2014, 414 p.
7. Croome D. The determinants of architectural form in modern buildings within the Arab world. Building and Environment, 1991, no. 26(4), pp. 349-362.
8. Hobbs J. Heritage in the lived environment of the United Arab Emirates and the gulf region. International Journal of Architectural Research, 2017, no. 2, pp. 55-82.
9. Almhrej Majid Ibrahim A Design Guide for Contemporary Saudi Arabian Homes in Riyadh. Doctoral thesis, Northumbria University. Newcastle, UK, 2015, 290 p.

10. AlZubaidi, Maha Sabah Salman. The sustainability potential of traditional architecture in the Arab world with reference to domestic buildings in the UAE. Doctoral thesis, University of Huddersfield, 2007, 393 p.
11. Ahmadreza Foruzanmehr. Thermal Comfort in Hot Dry Climates. Traditional Dwellings in Iran. Routledge, UA, 2018, 210 p.
12. Rapoport A. The Nature of the Courtyard House: A Conceptual Analysis. Traditional Dwellings and Settlements Review. 2007, vol. 18, no. 2(SPRING), pp. 57-72.
13. Moustapha A., Costa F. and Nobel A. Urban development in Saudi Arabia: building and subdivision codes. Butterworth & Co Limited, 1985, no. 2(2), pp. 140-148.
14. Fazia Ali-Toudert, Moussadek Djenane, Rafik Bensalem, Helmut Mayer. Outdoor thermal comfort in the old desert city of Beni-Isguen, Algeria. CLIMATE RESEARCH, 2005, vol. 28, pp. 243–256.
15. Grimmond C.S. B. Progress in measuring and observing the urban atmosphere. Theoretical and Applied Climatology, 2006, vol. 84, no.1-3, pp. 3-22.
16. Myagkov M.S., Gubernsky Yu.D., Konova L.I., Litzkevich V.K. *Gorod, arhitektura, chelovek i ilimat* [City, architecture, man and climate]. Moscow, Arhitektura-S, 2007, 344 p.
17. Eisa Zadeh Sepehr. Traditional city dwelling in historical cities of Iran. Architecture and Modern Information Technologies, 2011, no. 2(15), pp. 101-119. Available at: <https://marhi.ru/AMIT/2011/2kvart11/eisa/eisa.pdf>
18. Yousfi R., Zabalueva T. Traditional arabian architecture elements in energy efficient buildings. Architecture and Modern Information Technologies, 2017, no. 2(39), pp. 239-254. Available at: https://marhi.ru/AMIT/2017/2kvart17/PDF/19_AMIT_39_ZABALUEVA_YOUSFI_PDF.pdf

ОБ АВТОРЕ

Мягков Михаил Сергеевич

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

ABOUT THE AUTHOR

Myagkov Mikhail

PhD of Technical Sciences, Professor of «Architectural Physic» Department, Moscow Institute of Architecture (State Academy), Moscow, Russia
e-mail: eco-climate@mail.ru