

Сергей Валерьевич Корниенко

д-р техн. наук, зав. каф. архитектуры зданий и сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Россия, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1; e-mail: skorn73@mail.ru

ПАРАДОКСЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В МЕГАПОЛИСЕ

Показано, что городской микроклимат, строительная оболочка и инженерное оборудование здания тесно взаимосвязаны, поэтому должны рассматриваться как единая энергетическая система. Выявлены парадоксы энергосбережения в мегаполисе. Наличие парадоксов усложняет проблему, но позволяет более полно и точно подойти к ее решению. Преодоление парадоксов позволит разработать научно обоснованные решения экологически безопасных безуглеродных, биопозитивных, энергоэффективных, ресурсосберегающих зданий для развития устойчивой архитектуры.

Ключевые слова: энергоэффективность, энергосбережение, городской тепловой остров, аэрация, городской микроклимат, оболочка здания, инженерные системы, кинетическая архитектура.

Для цитирования: Корниенко С. В. Парадоксы энергосбережения в мегаполисе // Социология города. 2022. № 1-2. С. 43—58. DOI: 10.35211/19943520_2022_1-2_43

Дорога к истине вымощена парадоксами.
Оскар Уайльд

Введение

Сегодня в городах проживает каждый второй человек планеты. По сравнению с 1950 г. число городских жителей выросло примерно в 5,6 раза и составляет сейчас около 4,2 млрд человек. Департамент Организации Объединенных Наций по экономическим и социальным вопросам прогнозирует высокую степень урбанизации. По оценкам ведомства, к 2030 г. в мире будет 43 мегагорода с населением от 10 млн человек, а к 2050 г. уже 2/3 жителей планеты станут горожанами. Как считают эксперты ООН, население российских городов к середине XXI в. вырастет на 3 млн человек — до 110,6 млн. При этом доля городского населения по стране вырастет с 74,4 до 83,3 %. Наибольший рост городского населения будет происходить в развивающихся странах Азии и Африки.

Главными причинами роста городов являются:

- миграция населения из сельской местности в города в связи с растущими возможностями в городских районах;
- рост числа городов с улучшенной инфраструктурой в развивающихся странах;
- развитие ряда сельских районов до уровня городских.

Рост городского населения неизбежно приведет к значительному увеличению энергопотребления в городах. Известно, что здания и сооружения потребляют огромное количество топливно-энергетических ресурсов. Расход топлива на теплоснабжение зданий составляет около 40 % всего добываемого топлива. По-прежнему высока удельная теплопотребность зданий. По оценкам специалистов, средние затраты на отопление в жилых зданиях России составляют 350—380 кВт·ч/м² в год, а в некоторых типах зданий они достигают 680 кВт·ч/м² в год. Запасы органического топлива ограничены, что может уже в ближайшей перспективе создать дефицит энергии (Табунщиков, 2016).

Существенно ухудшается качество урбанизированной среды. Современный город является основным источником антропогенного загрязнения. Повышение выбросов парниковых газов в атмосферу за счет сжигания топлива формирует так называемый углеродный след, что создает риски, связанные с глобальным потеплением (Baranova, Sovetnikov, Vorodinecs, 2018). Повышение температуры воздуха в городе может нарушить тепловой баланс человека при теплообмене с окружающей средой, что повышает риски, связанные с ухудшением здоровья жителей. Вследствие инерционности среды в городе образуются интенсивные тепловые волны. Особенно опасно действие тепловых волн на людей пожилого возраста в летний период (Nami et al., 2019). Таким образом, строительство энергоэффективных, экологически безопасных, комфортных мегаполисов, безусловно, актуально. Каковы же особенности мегаполисов с точки зрения энергосбережения?

Особенности мегаполисов

Современные мегаполисы имеют своеобразие. По обе стороны улицы расположены многоэтажные протяженные здания. Высота зданий в несколько раз превышает ширину улицы. Высокая стоимость городского земельного участка приводит к формированию высокоплотной застройки (рис. 1). Образующиеся при этом городские каньоны и «человейники» концентрируют потоки энергии — тепловые острова.

Блокирование ветра в городской застройке препятствует охлаждению конвекцией и блокирует рассеивание загрязняющих веществ. Отработанное тепло от систем кондиционирования воздуха, автомобилей, промышленности и других источников также способствует росту тепловых островов.

Здания имеют сложную форму. Оболочка здания состоит из множества строительных материалов с различными свойствами. Стены имеют большие проемы. Практически полностью отсутствует городская зеленая инфраструктура. Ограничено применение возобновляемых источников энергии в городе.

Учет этих особенностей приводит к необходимости по-новому взглянуть на проблему энергосбережения в городе.



Рис. 1. Высокоплотная застройка мегаполисов: *а* — городской каньон (Гонконг, Китай); *б* — «человейник» (Санкт-Петербург, Россия)

Городской микроклимат, строительная оболочка и инженерное оборудование здания тесно взаимосвязаны, поэтому должны рассматриваться как единая энергетическая система (рис. 2).



Рис. 2. Городской микроклимат, строительная оболочка, инженерное оборудование — единая энергетическая система

В этой системе городской микроклимат, характеризуемый совокупностью климатических факторов (температура воздуха, солнечная радиация, влажность, ветер), играет определяющую роль при оценке и повышении энергоэффективности зданий. Ограждающие конструкции, формирующие строительную оболочку, должны обеспечить эффективную защиту здания от неблагоприятных климатических воздействий, одновременно являясь средством пассивного регулирования микроклимата в помещениях. Инженерное оборудование здания (системы отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха) обеспечивает активное регулирование микроклимата и создает тепловой комфорт в помещениях.

Рассматривая проблему повышения энергоэффективности современного мегаполиса с учетом присущих ему особенностей, неизбежно сталкиваешься с наличием парадоксов, т. е. рассуждений, которые расходятся с общепринятыми, кажутся нелогичными, противоречащими здравому смыслу. Объяснение этих парадоксов, выраженных в них противоречий, позволяет решить проблему энергоэффективности более точно и полно. Рассмотрим некоторые парадоксы, характерные для современного города.

Энергосбережение и городской тепловой остров

Известно, что в городе теплее, чем в его окрестности. Разность температур между городскими и пригородными районами может достигать 5 °С и более (Palme et al., 2020). В результате формируется так называемый городской тепловой остров — область, которая характеризуется повышенными, по сравнению с периферией, температурами воздуха.

Феномен городского острова тепла был известен еще в начале XIX в. благодаря работам Люка Говарда, однако приобрел особую актуальность лишь в последние десятилетия в связи с урбанизацией, усугубляющей последствия изменения климата в городах. Изменение теплового, воздушного и влажностного режимов городской среды влияет на качество воздуха и потребление энергии.

Многочисленные экспериментальные наблюдения показали, что характеристики в этом подслое тесно связаны с окружающей городской средой, а процессы лучистого теплообмена в основном зависят от геометрических характеристик городского ландшафта — улиц, площадей, стен зданий. В настоящее время широко применяют методы мониторинга численного моделирования окружающей среды, позволяющие уточнить характеристики городского ландшафта.

Каковы же причины образования городского теплового острова и стратегии его смягчения?

Одной из главной причин образования городского теплового острова являются морфологические особенности застройки. Высокоплотная застройка подобна радиаторам отопления. Увеличение городской поверхности путем «оробрения» земельного участка часто расположенными зданиями приводит к интенсификации процесса теплообмена с окружающей средой по сравнению с плоской поверхностью. В результате в зимний период вследствие разности температур внутреннего и наружного воздуха увеличиваются тепловые потоки через оболочку здания, что приводит к увеличению температуры воздуха между зданиями. Блокирование тепловых и воздушных потоков зданиями усиливает эффект теплового острова.

Образование городских тепловых островов тесно связано и с воздействием на здания солнечной радиации, что особенно ярко проявляется летом в условиях жаркого климата. Днем темные поверхности фасадов и крыш хорошо поглощают коротковолновое солнечное излучение, являясь своеобразными «тепловыми ловушками» (табл.). Ночью здания блокируют лучистые и конвективные тепловые потоки, препятствуя эффективному охлаждению поверхности городского каньона.

Проблему тепловых островов усугубляет недостаточная площадь озеленения городов. С уменьшением количества растительности город теряет тень,

испарительный охлаждающий эффект деревьев и грунтов. В жаркий полдень температура поверхности черной крыши (с покрытием из рубероида) может достигать 70—80 °С. Разность температур на поверхности черной крыши и озелененной поверхности может составлять 25—30 °С (Korniyenko, 2002). Незащищенные от солнца поверхности фасадов зданий, дорог и тротуаров нагреваются до высокой температуры и излучают тепловые волны в сторону пешеходов, что может причинить серьезный ущерб здоровью.

Суточные солнечные тепlopоступления и тепlopотери, отнесенные к 1 м² различных поверхностей (Saadatian et al., 2013)

Поверхность крыши	Тепlopоступления, кДж/м ²	Тепlopотери, кДж/м ²
Кустарник	0	104,2
Торф	29,2	62,1
Дерево	15,6	53,3
Открытая поверхность грунта	86,6	58,0
Твердое покрытие	366,3	4,2

Парадокс заключается в следующем. С одной стороны, повышение температуры воздуха в городе в связи с образованием городских тепловых островов способствует некоторому снижению нагрузок на отопление зданий в зимний период. С другой стороны, летом городской тепловой остров увеличивает нагрузку на охлаждение зданий и не может рассматриваться как положительный эффект.

Стратегии смягчения городского теплового острова включают комплекс архитектурно-планировочных, конструктивных и инженерно-технических мер.

Город должен иметь планировку, исключающую образование тепловых ловушек — городских каньонов и «человейников». Конфигурация здания в плане, ориентация и взаимное расположение зданий должны обеспечивать требуемую продолжительность инсоляции, а также надежную защиту от светового и теплового дискомфорта в условиях жаркого климата. Для улучшения городского микроклимата рекомендуется озеленение и обводнение внутриквартальных территорий и скверов в виде газонов, кустарников, вьющихся деревьев с густыми широкими кронами, фонтанов. Помещения зданий должны иметь наружную регулирующую солнцезащиту. Здания, находящиеся в зоне влияния городских парков, потребляют меньшее количество энергии на хладоснабжение (рис. 3).

Для снижения воздействия солнечной радиации на городской микроклимат, строительную оболочку и помещения эффективно применение белых и зеленых крыш (рис. 4).

Энергосбережение и воздухопроницаемость города

Городу нужен свежий воздух. Улучшение аэрации городских районов и кварталов является определяющим фактором повышения качества воздуха и энергоэффективности. Особенно важно решение этой задачи в условиях высокоплотной застройки. Эффективной стратегией является естественная вентиляция помещений. Она не требует применения дорогостоящего инженерного оборудования, проста и надежна в эксплуатации. Для работы естествен-

ной вентиляции необходима разность давлений снаружи и внутри здания. Разность давлений воздуха создается тепловым и ветровым напорами. Тепловой напор (эффект тяги) образуется вследствие разности температур наружного и внутреннего воздуха и мало зависит от городского ландшафта. Ветровой напор образуется на территории застройки и во многом зависит от характеристик городского ландшафта.

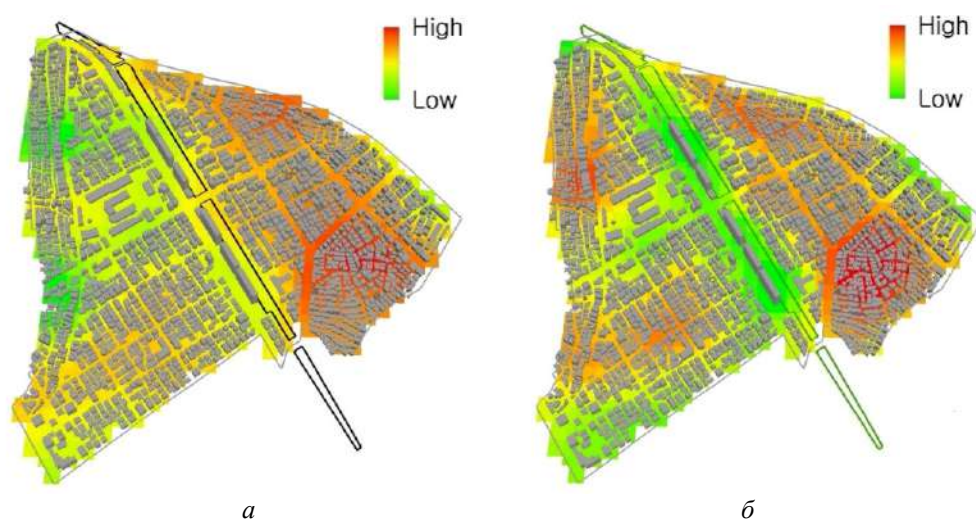


Рис. 3. Образование линейного теплового острова вдоль железной дороги (*а*) и его смягчение (*б*) после размещения городского парка в районе Сеула, Южная Корея (Kim et al., 2019); High — повышенная температура; Low — пониженная температура



Рис. 4. Белые и зеленые крыши

Таким образом, смягчение городских тепловых островов имеет высокий потенциал энергосбережения.

Парадокс в том, что повышение этажности улучшает вентиляцию зданий в зимний период, но при высокоплотной застройке, характерной для мегаполисов, ветровой напор существенно уменьшается, и главное в том, что существенно усложняется прогноз воздушного режима территории застройки.

Для изучения аэрации застройки применяют методы вычислительной гидродинамики (CFD), а также экспериментальные исследования в аэродинамической трубе. К сожалению, сложность математического аппарата, используемого в моделях, трудоемкость и дороговизна экспериментов сдерживают пока широкое применение методов на практике.

Исследовано влияние типа застройки на изменение среднего расхода воздуха (по отношению к отдельно стоящему зданию) с помощью стандартной модели турбулентности с краевыми условиями (Cheung, Liu, 2011). Расчет выполнен по компьютерной программе с учетом расположения зданий, преобладающих сезонных направлений ветра, интервалов между зданиями (рис. 5).

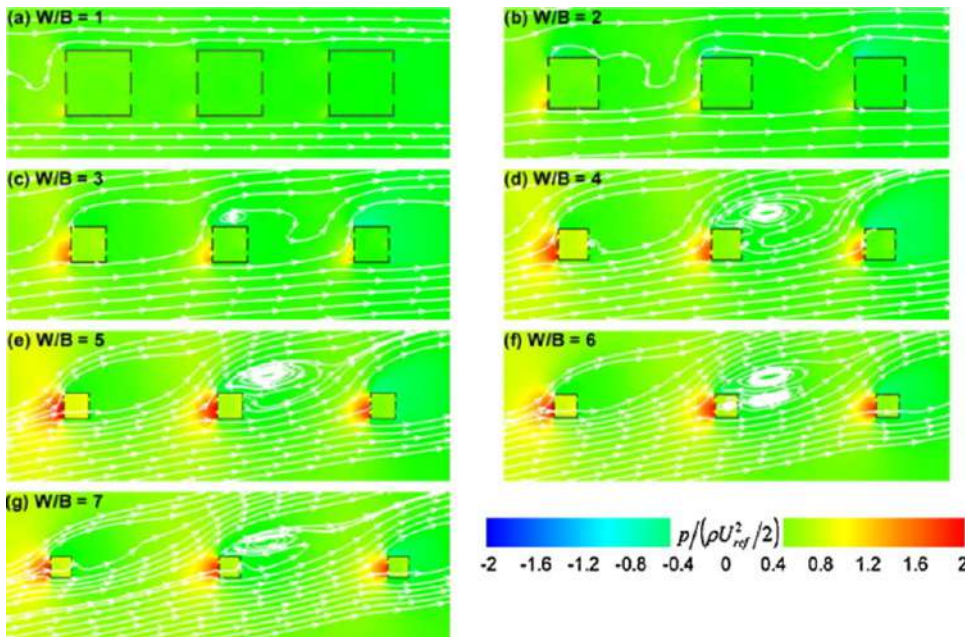


Рис. 5. Поля давлений и линии тока воздуха в горизонтальной плоскости (на уровне середины зданий) для прямоугольной застройки (Cheung, Liu, 2011): B — ширина здания; W — интервал между зданиями

По итогам моделирования (Там же) установлено, что при небольших интервалах между зданиями помехи, вносимые зданиями в поле давлений воздуха, существенны. Следовательно, высокоплотная прямоугольная застройка имеет низкую сквозную воздухопроницаемость, поэтому аэрация зданий затруднена.

С ростом интервала между зданиями ситуация становится более благоприятной, и при пятикратной ширине здания ($W = 5B$) отмечается макси-

мальный эффект. При такой компоновке происходит рост скорости воздушного потока, что приводит к усилению аэрации зданий. Максимальная эффективность аэрации отмечается при направлении ветра $\theta = 15^\circ$ к продольной оси застройки. При дальнейшем повышении интервала между зданиями эффективность аэрации застройки снижается.

Применение шахматной, более плотной, застройки позволяет уменьшить расстояние между зданиями до трехкратной ширины здания ($W = 3B$), сохранив при этом эффективность аэрации территории.

В работе (Mei et al., 2017) показано, что высокий аэрационный эффект может быть достигнут путем совершенствования морфологических характеристик жилой застройки.

Устройство зеленых коридоров с наветренной стороны усиливает эффект снижения температуры воздуха и в сочетании с надлежащим планированием территории является эффективной мерой по смягчению городского теплового острова (Guo et al., 2019).

Энергосбережение и форма зданий

Форма здания оказывает значительное влияние как на единовременные расходы, определяемые материалоемкостью оболочки, так и на эксплуатационные энергозатраты. В процессе эксплуатации здание подвергается различным климатическим воздействиям. В условиях холодного климата необходимо максимально сократить тепловые потери через строительную оболочку, уменьшив площадь теплообмена наружной поверхности с внешней средой. В жарком климате требуется свести к минимуму теплопоступления в здание от солнечной радиации (Vekkouche et al., 2016), поэтому для снижения неблагоприятных воздействий наружного климата необходимо сокращать площадь поверхности оболочки, возводя компактные здания с эффективным использованием энергии.

Для оценки эффективности формы широко применяют показатель компактности здания, равный отношению площади поверхности оболочки к объему здания (S/V). Архитектор Ральф Ноулз (Ralph Knowles) обнаружил, что этот показатель влияет на энергетическую эффективность здания. Чем меньше значение этого показателя, тем здание более компактно, а следовательно, менее подвержено влиянию климата (рис. 6).

Из рис. 6 видно, что наиболее компактной является модель здания кубической формы ($S/V = 2,5$). Считается, что интенсивность теплообмена граничащей с грунтом поверхности мала, поэтому эта поверхность исключается из общей поверхности оболочки. В дальнейшем кубическая форма здания принята за эталон. Показатель компактности модели протяженного здания ($S/V = 3,25$) выше, чем кубического, на 30 %, следовательно, эта модель в большей степени подвергается воздействию наружного климата и менее энергоэффективна. Еще более высокий показатель компактности ($S/V = 4,13$) имеет модель здания стержневой структуры (+65 % по сравнению с эталоном). Максимальный показатель компактности можно отметить для модели здания сложной формы ($S/V = 4,25$, или +70 % по сравнению с эталоном). Зимой эта модель подобна отопительному прибору, обогревающему улицу, а в летний период практически невозможно обеспечить комфортные условия в помещениях вследствие перегрева.

Пользуясь показателем компактности, можно выбрать эффективную форму здания. Как следует из приведенных выше рассуждений, при одних и тех же теплотехнических характеристиках оболочки максимальную эффективность формы будет иметь компактное здание кубической формы. Минимальная эффективность характерна для зданий сложной формы.

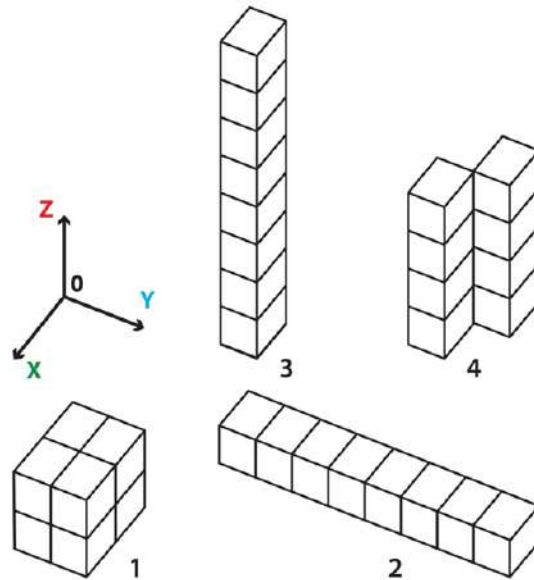


Рис. 6. Модели зданий различной формы: 1 — кубическая; 2 — протяженная; 3 — стержневая; 4 — сложная

Парадокс заключается в том, что здания сложной формы до сих пор строятся в мегаполисах, однако такие здания неэффективны с точки зрения экономии энергии. Усложнение формы здания требует более высокого уровня его теплозащиты. Такое здание дороже по сравнению со зданием простой формы.

Еще эпохи Античности известна идея «солнечного дома». «Солнечный дом» имеет компактную форму. В нем максимально использовалось зимнее солнце и полностью исключалось прямое попадание солнечного света с южной стороны летом. Для снижения теплопотерь северная стена дома теплоизолировалась, а в качестве тепловой буферной зоны использовалась кладовая. Данная идея весьма плодотворна. Она оказала большое влияние на современную архитектуру и нашла отражение в пассивном доме, солнечных стенах и солнечных оболочках (Rohdin et al., 2014; Vartholomaios, 2015).

Энергосбережение и строительная оболочка

В реальных элементах оболочки здания фактически нельзя выделить участок, в пределах которого передача теплоты происходит в одном направлении. Наличие в строительной оболочке теплотехнически неоднородных участков (краевых зон) в виде углов, оконных откосов, теплопроводных включений, балконных плит приводит к образованию в ней сложных двух- и трехмерных температурных полей и аномалий (рис. 7).

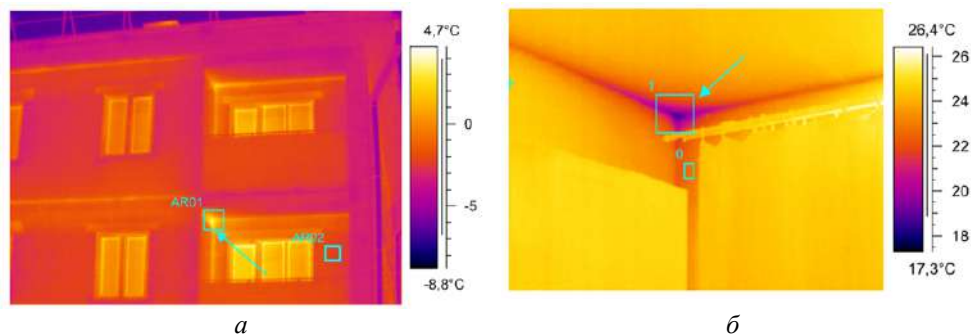


Рис. 7. Температурные аномалии стеновых ограждающих конструкций из автоклавных газобетонных блоков (Корниенко и др., 2018): *а* — повышенная температура в зоне сопряжения с балконной плитой; *б* — пониженная температура в зоне сопряжения угла с перекрытием

Строительный сектор ответственен за значительное потребление энергии и большие объемы выбросов парниковых газов во всем мире. Следовательно, снижение тепловых потерь через оболочку здания, особенно через наружные стены, имеет важное практическое значение.

Парадокс состоит в том, что применение современных материалов с высокими теплоизолирующими свойствами в целом повышает теплозащиту оболочки, но при этом резко возрастает влияние краевых зон.

Существует три типа краевых зон: геометрические, структурные и комбинированные. В геометрических краевых зонах, например в углах наружных стен, дополнительные тепловые потери возникают вследствие разности площадей внешней и внутренней поверхностей угла. В структурных краевых зонах — теплопроводных включениях — рост тепловых потерь обусловлен наличием материалов в толще стены, имеющих большую теплопроводность по сравнению с однородным участком стены. Наиболее сложными являются комбинированные краевые зоны, которые представляют собой различные сочетания структурных и геометрических краевых зон (консольные плиты балконов, оконные откосы и т. д.).

На рис. 8 наглядно показано изменение площади поперечного сечения краевых зон с различной теплопроводностью при одном и том же значении теплового потока. За базовый принят теплоизолирующий элемент из экструдированного пенополистирола. Элементы расположены по возрастанию теплопроводности.

Из рис. 8 видно, что наибольшую площадь сечения имеет элемент с наименьшей теплопроводностью [$\lambda = 0,031$ Вт/(м·К)]. С ростом теплопроводности сечения элементов уменьшаются. Так, например, элемент из керамзитобетона [$\lambda = 0,21$ Вт/(м·К)] имеет площадь сечения в 6,8 раза меньше, а элемент из стеклопластика [$\lambda = 0,35$ Вт/(м·К)] — в 11,3 раза меньше по сравнению с базовым элементом. Площадь железобетонного элемента [$\lambda = 1,69$ Вт/(м·К)] примерно в 55 раз меньше базового, а площадь стального элемента [$\lambda = 58$ Вт/(м·К)] меньше базового примерно в 2000 раз, т. е. превращается в точку. Следовательно, для того чтобы обеспечить равноэффективность теплозащиты различных элементов оболочки здания, необходимо, по возможности, исключить краевые зоны.

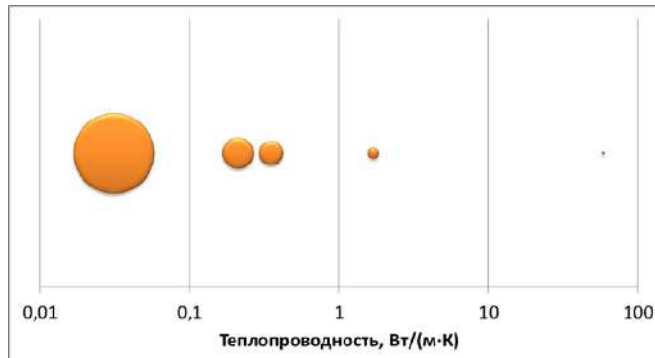


Рис. 8. Площадь поперечного сечения краевых зон с различной теплопроводностью

Наличие краевых зон в оболочке создает риски конденсации влаги и снижения энергоэффективности зданий. На основе численного моделирования установлено (Hallik, Kalamees, 2021), что уменьшение влияния краевых зон позволяет снизить потребность в отоплении на 17—25 % в зависимости от типа зданий в условиях средиземноморского климата. Учет влияния краевых зон (по сравнению с однородной оболочкой) увеличивает потребность в тепловой энергии здания на 30 % (цит. по: Saied et al., 2022).

По результатам серии лабораторных и натурных экспериментов, выполненных в умеренно морском климате, установлено (Там же), что риск конденсации влаги на стыках сопряжения оконных блоков со стеновыми проемами составляет: для зданий с бетонными стенами — 51 %; для зданий с кирпичными и деревянными стенами — 50 %. Итоги тепловизионного контроля качества оболочки многоквартирных жилых домов в умеренно континентальном климате России, выполненного автором, показали, что большинство (90 %) выявленных теплотехнических дефектов отмечается в зоне отколов наружных стен, 10 % — на участках наружных стен с теплопроводными включениями. Практически половина обследованных конструкций (51 %) подвержена конденсации влаги и образованию плесневых грибов при расчетных условиях, а 11 % обследованных конструкций имеет сквозное промерзание в узлах.

Теплоизоляция наружных стен с внутренней стороны, часто используемая при реконструкции зданий исторической застройки, улучшает теплозащитные свойства конструкции, однако несет опасность конденсации влаги на стыках материалов и требует всесторонней проверки (Korniienko, 2016).

Таким образом, для повышения энергоэффективности зданий необходимо максимально сократить добавочные тепловые потоки через краевые зоны. Некоторые приемы совершенствования конструктивного решения краевых зон даны в (Hallik, Kalamees, 2021). Наилучшим способом является возведение зданий без краевых зон.

Энергосбережение и кинетические фасады

Традиционный взгляд на город как систему тысячелетних неизменяемых форм сегодня является сомнительным. Возрастает потребность в развитии концепции кинетической архитектуры (Korniienko, 2021). В основу кинети-

ческой архитектуры положены принципы биомиметики — прикладной науки, вдохновленной природой. Биомиметика является современным научно обоснованным творческим методом архитектора (Корниенко, 2021).

Парадокс состоит в том, что применение биомиметических принципов в архитектуре позволяет точно регулировать климатические воздействия на оболочку здания в динамическом режиме, однако эти принципы до сих пор не нашли широкого использования в практике.

Исследование биологических объектов необходимо для поиска наиболее совершенных строительных технологий. Важно понимать механизмы регуляции процессов жизнедеятельности организмов. Одним из основных подходов в биомиметике является морфологический подход, суть которого заключается в изучении формы и строения организмов, веществ (животных, растений, почвы). Такой подход отражает современную направленность работ и позволяет создать высокую адаптируемость архитектурного объекта к условиям окружающей среды посредством применения динамических оболочек, имеющих сложную форму, с применением новейших композиционных материалов.

Интеграция сложной формы и умного материала позволяет создать интеллектуальную, адаптивную, инновационную систему для строительства. Как показано (Pfahl et al., 2017), такая система наиболее хорошо изучена применительно к процессам терморегуляции и дневного света (рис. 9).



Рис. 9. Консольный гелиостат комплекса One Central Park в Сиднее, Австралия (архитектор Н. Фостер и партнеры, архитектурное бюро Жана Нувеля и PTW Architects)

В биологии терморегуляция — это способность живых организмов поддерживать температуру тела в определенных границах, даже если температура внешней среды значительно отличается. Применение принципа терморегуляции в архитектуре позволяет создать комфортные условия в помещении за счет регулирования тепловых, воздушных и влажностных потоков через оболочку в различные периоды года.

Применение традиционных конструктивных решений и инженерных систем приводит к росту потребления энергии, что может в ближайшем будущем создать дефицит ископаемых видов топлива. В то же время регулирование тепловых и световых потоков позволяет повысить уровень тепловой защиты и энергосбережения в зданиях. Например, применение биодинамического двойного фасада позволяет повысить энергоэффективность здания до 70 %. Регулирование климатических воздействий имеет большой потенциал экономии энергии в офисных зданиях (20—30 %), а кинетические фотоэлементы слежения за Солнцем производят на 30—40 % больше энергии по сравнению с аналогичными системами (González-Pardo et al., 2014).

В соответствии с принципом биомиметики форма как бы следует за окружающей средой, подобно клеточным стенкам растений, обеспечивая при этом возможность в динамике контролировать потоки тепловой энергии и дневного света за счет применения кинетических фасадов.

В безуглеродном (или малоуглеродном) здании количество потребляемой энергии резко уменьшается за счет выбора наилучшей формы здания, высокоэффективной теплоизоляции оболочки, рекуперации тепловой энергии, применения естественной вентиляции, солнцезащиты, широкого использования возобновляемых источников энергии, внедрения современных цифровых технологий. В таких зданиях сбалансированное сочетание пассивных и активных стратегий позволяет обеспечить высокий уровень теплового и визуального комфорта при минимальном энергопотреблении в различных климатических условиях.

Выводы

Обоснована актуальность проблемы строительства энергоэффективных, экологически безопасных, комфортных мегаполисов. Учет особенностей урбанизированной среды приводит к необходимости по-новому взглянуть на проблему энергосбережения в городе. Показано, что городской микроклимат, строительная оболочка и инженерное оборудование здания тесно взаимосвязаны, поэтому должны рассматриваться как единая энергетическая система.

Выявлены парадоксы энергосбережения в мегаполисе, обусловленные феноменом образования городских тепловых островов, эффектом снижения воздухопроницаемости города, усложнением формы зданий, конструктивными особенностями оболочки здания, в частности наличием краевых зон, широкими возможностями кинетической архитектуры как эффективного инструментария динамического регулирования климатических воздействий. Наличие парадоксов усложняет проблему, но позволяет более полно и точно подойти к ее решению. Преодоление парадоксов позволит разработать научно обоснованные решения экологически безопасных, безуглеродных, биопозитивных, энергоэффективных, ресурсосберегающих зданий для развития устойчивой архитектуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Корниенко С. В. Биомиметика: идеи, вдохновленные природой // Социология города. 2021. № 4. С. 27—38.

Табунщиков Ю. А. Умные безуглеродные города и здания с нулевым энергопотреблением // АВОК. 2016. № 8. С. 4—8.

Baranova D., Sovetnikov D., Borodinecs A. The extensive analysis of building energy performance across the Baltic Sea region // *Science and Technology for the Built Environment*. 2018. Vol. 24. No. 9. Pp. 982—993.

Bekkouche S. M. A., Benouaz T., Cherier M. K., Hamdani M., Yaiche M. R., Benamrane N. Influence of the compactness index to increase the internal temperature of a building in Saharan climate // *Energy and Buildings*. 2016. Vol. 114. P. 265—274.

Cheung J. O. P., Liu C.-H. CFD simulations of natural ventilation behavior in high-rise buildings in regular and staggered arrangements at various spacings // *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43. Pp. 1149—1158.

González-Pardo A., Rodríguez A., González-Aguilar J., Romero M. Analysis of solar shading caused by building-integrated Vertical Heliostat Fields // *Energy and Buildings*. 2014. Vol. 76. Pp. 199—210.

Guo C., Buccolieri R., Gao Z. Characterizing the morphology of real street models and modeling its effect on thermal environment // *Energy and Buildings*. 2019. Vol. 203. P. 109433.

Hallik J., Kalamees T. The effect of flanking element length in thermal bridge calculation and possible simplifications to account for combined thermal bridges in well insulated building envelopes // *Energy and Buildings*. 2021. Vol. 252. P. 111397.

Hami A., Abdi B., Zarehaghi D., Maulan S. B. Assessing the thermal comfort effects of green spaces: A systematic review of methods, parameters, and plants' attributes // *Sustainable Cities and Society*. 2019. Vol. 49. P. 101634.

Kim K., Yi C., Lee S. Impact of urban characteristics on cooling energy consumption before and after construction of an urban park: The case of Gyeongui line forest in Seoul // *Energy and Buildings*. 2019. Vol. 191. Pp. 42—51.

Korniyenko S. Advanced hygrothermal performance of building component at reconstruction of S. Radonezhskiy temple in Volgograd // *MATEC Web of Conferences*. 2016. P. 01003.

Korniyenko S. Progressive trend in Adaptive Façade System technology. A Review // *AlfaBuild*. 2021. No. 1902. DOI: 10.34910/ALF.19.2.

Korniyenko S. V. Advantages, limitations and current trends in green roofs development. A review // *AlfaBuild*. 2021. No. 2002. DOI: 10.34910/ALF.20.2.

Korniyenko S. V., Vatin N. I., Gorshkov A. S., Olshevskiy V. I., Пестряков И. И. Теплотехническое качество наружных стен из автоклавных газобетонных блоков // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2018. № 7(70). С. 1—21.

Mei S.-J., Hua J.-T., Liu D., Zhao F.-Y., Li Y., Wang Y., Wang H.-Q. Wind driven natural ventilation in the idealized building block arrays with multiple urban morphologies and unique package building density // *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 155. Pp. 324—338.

Palme M., Privitera R., La Rosa D. The shading effects of Green Infrastructure in private residential areas: Building Performance Simulation to support urban planning // *Energy and Buildings*. 2020. Vol. 229. P. 110531.

Pfahl A., Coventry J., Röger M., Wolfertstetter F., Vásquez-Arango J. F., Gross F., Arjomandi M., Schwarzbözl P., Geiger M., Liedke P. Progress in heliostat development // *Solar Energy*. 2017. Vol. 152. Pp. 3—37.

Rohdin P., Molin A., Moshfegh B. Experiences from nine passive houses in Sweden — Indoor thermal environment and energy use // *Building and Environment*. 2014. Vol. 71. P. 176—185.

Saadatian O., Sopian K., Salleh E., Lim C. H., Riffat S., Saadatian E., Toudeshki A., Sulaiman M. Y. A review of energy aspects of green roofs // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 23. Pp. 155—168.

Saied A. E., Maalouf C., Bejat T., Wurtz E. Slab-on-grade thermal bridges: A thermal behavior and solution review // *Energy and Buildings*. 2022. Vol. 257. P. 111770.

Vartholomaios A. The residential solar block envelope: A method for enabling the development of compact urban blocks with high passive solar potential // *Energy and Buildings*. 2015. Vol. 99. Pp. 303—312.

Sergey V. Kornienko

Doctor of Engineering Sciences, Head of Architecture of Buildings and Constructions Department, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; e-mail: skorn73@mail.ru

PARADOXES OF ENERGY SAVING IN METROPOLIS

Abstract. The paper demonstrates that urban microclimate, building envelope and HVAC-systems are closely interrelated, thus this aspects should be considered as a single energy system. Paradoxes of energy saving in the metropolis have been identified. These paradoxes complicate the problem, but allow you to more fully and accurately approach its solution. Overcoming paradoxes will make it possible to develop science-based solutions for environmentally friendly, carbon neutral, bio-positive, energy-efficient, resource-saving buildings for the development of sustainable architecture.

Keywords: energy efficiency, energy saving, urban heat island, aeration, urban microclimate, building envelope, HVAC-systems, kinetic architecture.

For citation: Kornienko S. S. (2022) Paradoxes of energy saving in metropolis. *Sotsiologiya Goroda* [Urban Sociology], no. 1-2, pp. 43—58 (in Russian). DOI: 10.35211/19943520_2022_1-2_43

REFERENCES

- Baranova D., Sovetnikov D., Borodinecs A. (2018) The extensive analysis of building energy performance across the Baltic Sea region. *Science and Technology for the Built Environment*, vol. 24, no. 9, pp. 982—993.
- Bekkouch S. M. A., Benouaz T., Cherier M. K., Hamdani M., Yaiche M. R., Benamrane N. (2016) Influence of the compactness index to increase the internal temperature of a building in Saharan climate. *Energy and Buildings*, vol. 114, pp. 265—274.
- Cheung J. O. P., Liu C.-H. (2011) CFD simulations of natural ventilation behavior in high-rise buildings in regular and staggered arrangements at various spacings. *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 1149—1158.
- González-Pardo A., Rodríguez A., González-Aguilar J., Romero M. (2014) Analysis of solar shading caused by building-integrated Vertical HelioStat Fields. *Energy and Buildings*, vol. 76, pp. 199—210.
- Guo C., Buccolieri R., Gao Z. (2019) Characterizing the morphology of real street models and modeling its effect on thermal environment. *Energy and Buildings*, vol. 203, pp. 109433.
- Hami A., Abdi B., Zarehaghi D., Maulan S.B. (2019) Assessing the thermal comfort effects of green spaces: A systematic review of methods, parameters, and plants' attributes. *Sustainable Cities and Society*, vol. 49, p. 101634.
- Kim K., Yi C., Lee S. (2019) Impact of urban characteristics on cooling energy consumption before and after construction of an urban park: The case of Gyeongui line forest in Seoul. *Energy and Buildings*, vol. 191, pp. 42—51.
- Korniyenko S. V. (2021) Advantages, limitations and current trends in green roofs development. A review. *AlfaBuild*, no. 2002. DOI: 10.34910/ALF.20.2.
- Korniyenko S. (2016) Advanced hygrothermal performance of building component at reconstruction of S. Radonezhskiy temple in Volgograd. *MATEC Web of Conferences*. P. 01003.

- Kornienko S. V. (2021) Biomimetika: idei, vdokhnovlennyye priirodoy. *Sotsiologiya goroda* [Urban Sociology], no. 4, pp. 27—38 (in Russian).
- Korniyenko S. (2021) Progressive trend in Adaptive Façade System technology. A Review. *AlfaBuild*, no. 1902. DOI: 10.34910/ALF.19.2.
- Kornienko S. V., Vatin N. I., Gorshkov A. S., Ol'shevskiy V. Ya, Pestryakov I. I. (2018) Thermal engineering quality of external walls from autoclaved aerated concrete blocks. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy* [Construction of unique buildings and structures], no. 7(70), pp. 1—21 (in Russian).
- Mei S.-J., Hua J.-T., Liu D., Zhao F.-Y., Li Y., Wang Y., Wang H.-Q. (2017) Wind driven natural ventilation in the idealized building block arrays with multiple urban morphologies and unique package building density. *Energy and Buildings*, vol. 155, pp. 324—338.
- Palme M., Privitera R., La Rosa D. (2020) The shading effects of Green Infrastructure in private residential areas: Building Performance Simulation to support urban planning. *Energy and Buildings*, vol. 229, p. 110531.
- Pfahl A., Coventry J., Röger M., Wolfertstetter F., Vásquez-Arango J.F., Gross F., Arjomandi M., Schwarzbözl P., Geiger M., Liedke P. (2017) Progress in heliostat development. *Solar Energy*, vol. 152, pp. 3—37.
- Rohdin P., Molin A., Moshfegh B. (2014) Experiences from nine passive houses in Sweden — Indoor thermal environment and energy use. *Building and Environment*, vol. 71, pp. 176—185.
- Saadatian O., Sopian K., Salleh E., Lim C. H., Riffat S., Saadatian E., Toudeshki A., Sulaiman M. Y. (2013) A review of energy aspects of green roofs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 23, pp. 155—168.
- Saied A. E., Maalouf C., Bejat T., Wurtz E. (2022) Slab-on-grade thermal bridges: A thermal behavior and solution review. *Energy and Buildings*, vol. 257, p. 111770.
- Tabunshchikov Yu. A. (2016) Smart carbon-free cities and zero-energy buildings. *AVOK*, no. 8, pp. 4—8 (in Russian).
- Vartholomaios A. (2015) The residential solar block envelope: A method for enabling the development of compact urban blocks with high passive solar potential. *Energy and Buildings*, vol. 99, pp. 303—312.
- Hallik J., Kalamees T. (2021) The effect of flanking element length in thermal bridge calculation and possible simplifications to account for combined thermal bridges in well insulated building envelopes. *Energy and Buildings*, vol. 252, p. 111397.

Поступила в редакцию 26.04.2022

Принята в печать 10.05.2022

Received: 26.04.2022

Accepted for publication: 26.05.2022