



ТРИ АСПЕКТА КОНЦЕПЦИИ «УМНЫЙ ГОРОД» ДЛЯ ЭНЕРГОПЕРЕХОДА К БЕЗУГЛЕРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: умный город, энергопереход, возобновляемые источники энергии, цифровизация, безуглеродная энергетика

С. В. Корниенко, доктор технических наук, советник РААСН, заведующий кафедрой «Архитектура зданий и сооружений» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

По прогнозам ООН [1], к 2050 году население Земли вырастет до 9,7 млрд человек, при этом около 48 % людей будут проживать в крупных городах. Уже сегодня наблюдается активное переселение жителей в городские агломерации. Данная тенденция приводит к росту городов и порождает новые вызовы, ответом на которые может быть развитие концепции «умный город».

Предлагаем три ключевых аспекта концепции «умный город», основанных на принципах интеллектуализации городов и учитывающих новейшие научные достижения в этой области, реализация которых позволит обеспечить энергопереход к безуглеродной энергетике.



Фото: BlancoBlue / Depositphotos

На основе принципов умного города с учетом новейших научных достижений в этой области предлагаем три ключевых аспекта концепции «умный город», реализация которых позволит обеспечить энергопереход к безуглеродной энергетике.

По прогнозам ООН [1], к 2050 г. население Земли вырастет до 9,7 млрд человек, при этом около 48 % людей будут проживать в крупных городах.

Основным фактором роста городов является их социально-экономическая привлекательность — относительно высокие доходы, развитая социальная инфраструктура и культурная среда, высокая занятость населения. В результате происходит увеличение доли городского населения с преимущественным ростом мегаполисов, где достигается более высокая плотность населения по сравнению с менее крупными городами [2, 3].

Рост городов порождает новые вызовы. Концентрация городского населения требует все больше энергии, что, в свою очередь, усугубляет и без того сложную экологическую обстановку. Другим фактором, определяющим динамику и структуру энергопотребления городов, являются региональные проявления глобальных климатических процессов и локальные климатические эффекты, вызванные особенностями инфраструктуры крупных городов [4, 5]. Доля потребления энергии информационно-телекоммуникационной инфраструктурой уже превышает 30 % мирового производства электроэнергии, что в ближайшей перспективе может создать серьезные энергоресурсные ограничения для цифровой экономики.

Ответом на эти вызовы является развитие концепции «умный город». Она затрагивает многие сферы: управление, окружающую среду, транспорт, общество, проживание, экономику [6]. Умный город — открытая система, обменивающаяся с окружающей средой энергией, веществом, информацией. Системное энергетическое обновление городов является актуальной проблемой. Пути ее решения недостаточно полно отражены в литературе, что затрудняет устойчивый переход к экологически чистым источникам и энергоэффективным системам.

На основе принципов умного города [7] с учетом новейших научных достижений в этой области предлагаем три ключевых аспекта концепции «умный город» с целью энергоперехода к безуглеродной энергетике.

Интеграция возобновляемых источников энергии в городскую среду

В 2025 г. более 34 % мировой электроэнергии было произведено из возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Наибольший рост среди ВИЭ показала солнечная генерация, при этом выработка электроэнергии за счет ветра оставалась более дешевой [8].

Фотоэлектрические системы *in situ*

Солнечные модули могут быть установлены на крыше дома, его фасаде или отдельно в виде навеса на придомовой территории. Главными преимуществами этого способа являются: высокая скорость строительно-монтажных работ, относительная простота реализации, применимость для различных типов зданий.

Годовая выработка электроэнергии солнечными панелями в климатических условиях Московского региона составляет примерно 1 000 кВт•ч на 1 кВт установленной мощности [9]. Это позволяет достичь нулевого углеродного следа и положительного энергетического баланса индивидуальных жилых домов за счет передачи излишков электроэнергии в общую сеть.

Принципиально новым решением является интеграция фотоэлектрических систем в здания. В этом случае процесс солнечной генерации и защитные свойства оболочки совмещаются. Фотоэлектрические модули могут встраиваться в плоские и скатные крыши, фасадные конструкции, окна различной формы. Такое решение выгодно с архитектурной точки зрения, так как позволяет имитировать различные материалы при сохранении мощности.

Первое в мире высотное здание с нулевым углеродным следом построено в 2025 г. в Китае. Это офисный центр высотой 117 м, ежедневно потребляющий 6 000 кВт•ч электроэнергии. Фотоэлектрические панели интегрированы в фасады, их выработка покрывает 25 % энергетических потребностей здания. Излишки энергии накапливают размещенные здесь же 14 списанных аккумуляторов электромобилей [10].

Ветрогенераторы

На втором месте по частоте использования стоит ветрогенерация.

Использование энергии ветра особенно актуально при строительстве высотных зданий. Обычно ветровые турби-

ны размещают на технических этажах. Благодаря архитектурной форме здания воздушные потоки обеспечивают вращение турбин, способствуя выработке экологически чистой энергии.

Ветрогенератор мощностью 1 МВт сокращает ежегодные выбросы в атмосферу на 1 800 т CO₂, 9 т SO₂ и 4 т оксидов азота [11].

По сравнению с традиционной выработкой электроэнергии с использованием ископаемого топлива ветрогенераторы имеют значительные экологические преимущества. В отличие от фотоэлектрических систем работа ветрогенераторов не зависит от солнца, но у них есть такие недостатки, как неравномерная выработка электроэнергии вследствие нестабильности силы ветра, шум от вращающихся турбин и визуальный дискомфорт из-за эффекта мерцания света и тени [12].

Экономически целесообразно применение ветрогенераторов только на тех территориях, где среднегодовая скорость ветра превышает 5 м/с.

Наиболее эффективно одновременное использование различных видов альтернативной энергетики, например ветровой, солнечной и геотермальной. Дополняя друг друга, они могут обеспечить производство необходимого количества электроэнергии на любых территориях и при любых климатических условиях.

Мини-ТЭЦ

В последнее время в промышленности и жилищно-коммунальном хозяйстве все более осознается необходимость комбинированного производства электрической и тепловой энергии на паровых мини-теплоэлектроцентралях (мини-ТЭЦ), располагаемых в непосредственной близости от потребителя. Это связано с постоянным удорожанием электроэнергии, учащением аномальных шквальных ветров и заморозков, приводящих к обрыву проводов централизованного электроснабжения.

Традиционная выработка электроэнергии на основе ископаемого топлива имеет КПД от 40 до 45 %; при одновременном производстве тепловой и электрической энергии КПД возрастает до 85–90 % [13].

Экологические показатели работы современных паровых котлов удовлетворяют нормативным требованиям. Реализация отечественной технологии сжигания твердого топлива в высокотемпературном циркулирующем кипящем слое дает возможность обеспечить работу котла с низкими выбросами в атмосферу.

Паромоторные мини-ТЭЦ эффективнее паротурбинных. В них удельный расход пара на выработку электроэнергии в 1,3–1,5 раза меньше, чем в паротурбинных мини-ТЭЦ, при сопоставимом ресурсе до капитального ремонта [13].

Паромоторные электрогенерирующие агрегаты могут быть эффективно использованы в солнечных электростанциях, где для получения пара применяют котлы не с топками, а с солнечными коллекторами. Это позволяет получить безуглеродное решение, основанное на солнце, воде и паре, что особенно важно для развития крупных городов.

Цифровизация энергетики и управление энергопотреблением зданий

Искусственный интеллект

Энергетические системы с искусственным интеллектом (ИИ) имеют преимущества по сравнению с традиционными системами. ИИ дает возможность оптимизировать энергопотребление, управлять накопителями энергии, прогнозировать нагрузки. Это происходит благодаря интеллектуальному управлению энергетической инфраструктурой среды обитания человека [14].

ИИ позволяет анализировать данные, принимать решения, обучаться на опыте.

В основе ИИ-систем лежат:

- машинное обучение – алгоритмы, которые находят закономерности в данных и учатся на примерах, а не следуют жестко установленным правилам;
- нейронные сети – математические модели для обработки информации, вдохновленные природой;
- глубокое обучение – разновидность машинного обучения с многослойными нейронными сетями;
- генеративные модели – инструмент для создания нового контента.

Для устойчивой работы ИИ нужны три ключевых компонента: качественные данные для обучения, вычислительные мощности и эффективные алгоритмы.

В [12] показано, что средняя относительная ошибка при решении задачи оптимизации конфигурации фотоэлектрических систем, интегрированных в здание, с помощью ИИ составляет 15 %.

Энергетические системы, использующие ИИ, находятся в тренде цифровизации энергетики и уже успешно применяются в мегаполисах.

Интернет вещей и блокчейн

Цифровые технологии, включая Интернет вещей и блокчейн, разработаны и внедрены для повышения энергоэффективности зданий, сокращения выбросов углекислого газа и интеллектуального управления энергопотреблением.

Применение Интернета вещей и блокчейна позволяет решать следующие задачи:

- повысить надежность и срок службы сети за счет сглаживания пиков и заполнения впадин профилей потребляемой энергии, снижая нагрузку на генераторы и сети;
- разработать оптимальную стратегию ценообразования энергии *in situ* за счет «энергетического перелопачивания» между потребителями («энергетический Интернет»);
- создать надежные и безопасные системы управления энергетической инфраструктурой на основе оптимального пространственного распределения;
- обеспечить оптимальные параметры микроклимата помещений и их регулирование при минимальных энергетических затратах в режиме реального времени;
- настроить работу систем отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха помещений с умными счетчиками;
- реализовать технологию взаимодействия городских транспортных средств (электробусов, электромобилей) с энергосетью с поддержкой двунаправленной зарядки; электро-



транспорт заряжается от сети в том случае, если электричество дешевле или в системе имеется избыток сгенерированной энергии от ВИЭ;

- оптимизировать работу систем наружного искусственного освещения зданий и городов с точки зрения безопасности, снижения светового загрязнения окружающей среды, повышения качества архитектурного освещения и светового дизайна.

Интернет вещей и блокчейн эффективны с точки зрения управления энергосистемами для достижения углеродной нейтральности.

Цифровой энергетический двойник

Цифровой энергетический двойник (ЦЭД) — инновационный инструмент, позволяющий моделировать и прогнозировать энергопотребление, а также системно поддерживать комфортную среду обитания [15]. В отличие от BIM-моделей, сосредоточенных на этапе проектирования и строительства, ЦЭД акцентируется на фактической работе объекта (здания, района, города), позволяя в режиме реального времени моделировать, отслеживать и оптимизировать его энергетические характеристики.

ЦЭД представляет собой цифровой программно-аппаратный аналитический комплекс, объединяющий три ключевых элемента:

- цифровая энергомодель эксплуатируемого объекта — основа ЦЭД, создаваемая по результатам обследования;
- средства обмена данными между системами и цифровой энергомоделью с помощью умных датчиков и счетчиков;
- система хранения, анализа, обработки и отображения данных в режиме реального времени.

ЦЭД без непосредственного физического внедрения решения может показать, к каким изменениям оно приведет. Например, как изменится фактическое энергопотребление здания и какими будут параметры микроклимата в помещениях при озеленении крыш и фасадов, как повлияет замена окон и входных дверей на энергоэффективные, какой эффект даст теплозащита стеновых ограждающих конструкций, как изменится энергетическая инфраструктура города при интеграции ВИЭ в городскую среду. Следовательно, данный инструмент предупредит внедрение неэффективных решений и выявит лучшие.

ЦЭД города как многослойной нелинейной системы [7] позволяет раскрыть синергетический эффект систем, обеспечивая устойчивый энергопереход к безуглеродной энергетике.

Климатоадаптивные решения

Климатоп как климатический маркер урбанизированных территорий

В климатологии относительно новым научным направлением является изучение локальных климатических зон — климатопов. Климатоп является климатическим маркером урбанизированных территорий и позволяет эффективно оценить микроклимат города, отдельных городских территорий, типов застроек.

С использованием данных оптического дистанционного зондирования в летний период вычислены тепловые индексы городской среды (ТИГС) для климатопов различных территориальных зон и всего города (на примере Волгограда) [16].

Минимальный ТИГС = 0,41 имеют зеленые зоны. Здесь температурный режим наиболее благоприятный, перегрев полностью исключен. В жилых зонах (ТИГС = 0,44–0,46) температурный режим несколько хуже и существенно зависит от плотности застройки, высоты зданий и способов их размещения. В общественно-деловых зонах (ТИГС = 0,52) температурный режим еще более ухудшается, что связано с повышением плотности застройки. Повышение температуры в производственных зонах (ТИГС = 0,56) и зонах инженерной инфраструктуры (ТИГС = 0,60) в значительной степени связано с выбросами предприятий и воздействием объектов инженерной инфраструктуры на окружающую среду. Максимальный ТИГС = 0,62 имеют зоны сельскохозяйственного использования, что связано, по-видимому, с интенсивным воздействием прямой солнечной радиации на открытые грунтовые поверхности и растительный слой. Для города в целом ТИГС = 0,52, что означает умеренную выраженность городского острова теплоты.

Климатопы дают возможность уточнить климатологическое обеспечение зданий при определении нагрузок на системы тепло- и хладоснабжения зданий. Они являются эффективным инструментом, позволяющим адаптировать городские территории к условиям меняющегося климата.

Умные оболочки зданий

Умная оболочка здания — система, которая воспринимает климатические воздействия, адаптируется к ним и регулирует микроклимат в помещениях за счет интеграции технологий

интеллектуального управления и использования новых материалов, изделий и конструкций [17].

Принципиальным отличием умных оболочек от традиционных систем является возможность их автономного подстраивания, адаптации к изменениям климатических воздействий для создания оптимального микроклимата в помещениях при минимальных энергетических затратах.

Влияние умных оболочек на архитектуру зданий трудно переоценить.

Во-первых, сама архитектура становится умной оболочкой. Функция здания, его форма и ограждающие конструкции максимально подстраиваются к изменениям окружающей среды, а инженерные элементы активно влияют на архитектурный образ зданий.

Во-вторых, интеграция умных оболочек зданий в городские планировочные образования (районы, кварталы) одновременно способствует улучшению микроклимата, защите окружающей среды, применению биопозитивных технологий.

В-третьих, сложившееся ранее разделение на инженерные и архитектурные аспекты проектирования умных оболочек постепенно стирается и в дальнейшем на основе синтеза инженерии и архитектуры будет сформирован системный подход, позволяющий наиболее успешно развивать концепцию комфортного, энергоэффективного, экологически безопасного здания.

Инженерные особенности умных оболочек являются предметом интенсивных научных исследований и дискуссий.

Адаптивный микроклимат помещений

Адаптивный микроклимат помещений позволяет поддерживать оптимальные параметры внутренней среды (температура, влажность, подвижность и качество воздуха и др.) с автоматическим подстраиванием под текущие условия и потребности людей.

Повышение энергоэффективности и декарбонизация в этом случае достигаются путем таких мер, как:

- снижение пиковых нагрузок за счет гибкого управления;
- применение систем вентиляции с регулируемым расходом воздуха и рекуперацией теплоты;
- совместимость с ВИЭ для более активного использования энергии;
- связь с Интернетом вещей и блокчейном, что позволяет более эффективно настраивать системы отопления, кондиционирования, освещения в соответствии с потребностями пользователей;
- применение ИИ и управление данными – система может учитывать изменения погоды, условия эксплуатации помещений, привычки пользователей и заранее корректировать режимы управления данными.

Применение адаптивных технологий позволяет снизить общую отопительную нагрузку многоквартирного дома на 24,2 % [18].

Предлагаемые аспекты могут быть положены в основу развития концепции «умный город». Их реализация позволит обеспечить устойчивый энергопереход к безуглеродной энергетике.

Литература

1. The World's Cities in 2025: Data Booklet. United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2026.
2. Табунщиков Ю. А. Экология среды обитания человека: реальность, которую игнорировать бесконечно опасно // АВОК. 2023. № 3. С. 4–15.
3. Бродач М. М., Шилкин Н. В. Принципы ESG в строительстве. Создание устойчивой, экологически ответственной и социально ориентированной среды обитания // Энергосбережение. 2025. № 2. С. 4–6.
4. Клименко В. В., Гинзбург А. С., Демченко П. Ф., Терешин А. Г., Белова И. Н., Касилова Е. В. Влияние урбанизации и потепления климата на энергопотребление больших городов // Доклады Академии наук. 2016. Т. 470. № 5. С. 519–524.
5. Васильев Г. П., Горшков А. С., Лысак Т. М., Горнов В. Ф., Колесова М. В. и др. Анализ изменения температур наружного воздуха в Москве // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2025. № 1 (98). С. 384–395.
6. Smart Environment for Smart Cities: Advances in 21st Century Human Settlements. Editor T. M. Vinod Kumar: Springer, 2020.
7. Корниенко С. В., Ишмаметов Р. Х. Принципы умного города // Социология города. 2019. № 2. С. 37–45.
8. An J., Hong J., Kang H., Yeom S., Jung D., et al. The first step towards energy self-sufficiency in smart cities: The present and future of virtual power plant technology // Building and Environment. 2025. Vol. 277. Article 112920.
9. Султангузин И. А., Чайкин В. Ю., Яворовский Ю. В., Калякин И. Д., Говорин А. В., Скоробатюк А. В. Система солнечного электроснабжения дома с нулевым углеродным следом // Энергосбережение. 2025. № 2.
10. Zhang P., Fu Y., Jia B., Zelele T., Al-Hussein M., et al. Quantifying operational-phase carbon sequestration in urban concrete buildings: A spatiotemporal analysis of Qingdao City // Energy and Buildings. 2025. Vol. 349. Article 116549.
11. Шонина Н. А. Ветроэнергетика // Сантехника. 2012. № 2.
12. Zhou Y., Liu J. Advances in emerging digital technologies for energy efficiency and energy integration in smart cities // Energy and Buildings. 2024. Vol. 315. Article 114289.
13. Трохин И. С. Мини-ТЭЦ с паровыми моторами – реальность XXI века // Энергосбережение. 2012. № 2.
14. Табунщиков Ю. А. Искусственный интеллект управления энергетической инфраструктурой среды обитания человека // Энергосбережение. 2020. № 2.
15. Деев А. С., Львов В. Д. Цифровой энергетический двойник здания – инструмент по управлению энергоэффективностью и комфортом // АВОК. 2025. № 6.
16. Корниенко С. В. Климатоп как климатический маркер урбанизированных территорий // Социология города. 2023. № 1. С. 100–112.
17. Корниенко С. В. Умные оболочки зданий. Инженерные решения и влияние на архитектуру // Энергосбережение. 2026. № 3. С. 34–37.
18. Korniyenko S. V., Dubov I. A., Nazarov K. R. Field study of thermal comfort in dwelling during the winter, mid-season and summer // Magazine of Civil Engineering. 2023. Vol. 121 (5). Article 12101. ■