

ГОРОДА БУДУЩЕГО: ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И ТРЕБОВАНИЯ К ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЮ

© 2025 г. В.А. Кулагин^{а,*}, Д.А. Грушевенко^{а,**}, А.А. Галкина^{а,***}

^аИнститут энергетических исследований РАН, Москва, Россия

*E-mail: vakulagin@ineiran.ru

**E-mail: grushevenkod@gmail.com

***E-mail: annegalkina@gmail.com

Поступила в редакцию 02.09.2024 г.

После доработки 29.12.2024 г.

Принята к публикации 24.02.2025 г.

Жители мегаполисов мечтают об улучшении качества жизни, экологической обстановки, решении транспортных проблем, повышении уровня комфорта и безопасности. Научно-технологический прогресс открывает возможности для инновационного развития городской среды. Энергоснабжение при этом становится одним из ключевых элементов города будущего, ведь умные роботизированные системы будут зависеть от его устойчивости. Структура энергосистемы и организация её работы определяют затраты на энергию, объёмы вредных выбросов, рациональные способы теплоснабжения, степень участия устройств потребителя в балансировании нагрузки. Действующие проекты городов будущего позволили на практике проверить жизнеспособность различных решений и выявить ряд ограничений и проблем. Перечисленные в статье направления развития энергетического комплекса обозначили аспекты, на которые нужно обратить внимание уже сегодня. Важно, чтобы в планах были заложены гибкость и возможность расширения городов, что обеспечит внедрение инноваций. Грамотное ведение городского хозяйства, в свою очередь, поможет сбалансировать нагрузку на энергосистему, а значит, сократить общие затраты на энергоснабжение.

Ключевые слова: города будущего, энергоснабжение, транспорт, экология, электричество, умные системы.

DOI: 10.31857/S0869587325030063, **EDN:** CUBENS

Города будущего вызывают большой интерес не только у потенциальных жителей, но и у представителей органов власти, бизнеса, архитекторов и учёных. Нужно оценить условия жизни грядущих поколений и нащупать новые направления реализации творческого, управленческого и коммерче-

ского потенциала. Планирование городов без учёта их последующего развития зачастую препятствует внедрению новых технологических решений, созданию необходимой инфраструктуры, повышению стандартов жизни людей [1]. Поэтому действовать надо на перспективу. Потребности завтрашнего дня



КУЛАГИН Вячеслав Александрович – заведующий отделом развития энергетического комплекса мира и России ИНЭИ РАН. ГРУШЕВЕНКО Дмитрий Александрович – старший научный сотрудник ИНЭИ РАН. ГАЛКИНА Анна Александровна – старший научный сотрудник ИНЭИ РАН.

уже сейчас должны быть заложены в основу ключевых направлений научно-технического прогресса и подготовки персонала.

Анализ публикаций, обсуждений на форумах и конференциях, посвящённых перспективным проектам высокотехнологичных мегаполисов, помог выделить основные требования к городам будущего:

- чистые воздух, вода и улицы, большое количество зелёных зон;
- отсутствие транспортных пробок;
- удобное и быстрое перемещение;
- комфортные условия в каждом районе проживания с инфраструктурой, находящейся в шаговой доступности (бассейны, образовательные центры, спортзалы, прогулочные зоны, магазины, парки, кинотеатры, рестораны);
- оперативная доставка товаров;
- минимизация времени ожидания;
- эффективное использование всех видов ресурсов;
- безопасность;
- эстетичность.

Конечно, на пути к достижению перечисленных условий встанут технологические и экономические ограничения. На практике градостроители стремятся максимально приблизиться к идеалу. При этом важнейшим критерием остаются приемлемые затраты на проживание.

Предлагаемые решения. Комплекс решений, направленных на удовлетворение будущих потребностей, проще всего реализовать в построенных с нуля городах, которые, кроме того, могут послужить демонстрационной площадкой. Однако чаще речь идёт о развитии уже существующих населённых пунктов. Для повышения эффективности использования ресурсов возводят здания с низким энергопотреблением за счёт высокой теплоизоляции, умных систем регулирования климата и освещения в помещениях, датчиков движения. Повышается интерес к повторному использованию воды, пластика, бумаги, стекла и т.д.

Одна из главных проблем современных мегаполисов — транспорт [1, 2]. С ним связаны пробки, шум, выбросы, сложности с перемещением пешеходов, травмоопасность. Неслучайно архитекторы стремятся к минимизации транспортных средств на улицах. Часто для этого предлагается перенести парковки и автотрассы под землю, а также сократить количество личных машин путём развития общественного транспорта и расширения транспортных услуг. Перемещение на автомобиле станет бессмысленным благодаря концентрации всего необходимого в шаговой доступности, развитию беспилотной автономной доставки, пешеходной и велосипедной инфраструктуры, сети общественного транспор-

та. Повышенное внимание уделяется переходу на более экологичные транспортные средства: это и получивший широкое распространение электро-транспорт (электромобили, электробусы, метро, трамваи) [3], и, например, водородный транспорт [4] или перемещение по туннелям в специализированных капсулах. Для преодоления больших расстояний рассматриваются варианты гиперлупов — поездов, передвигающихся в вакууме со скоростями, сравнимыми со скоростью самолётов [5]. Перспективные транспортные решения направлены не только на перемещение людей и доставку грузов. Предлагается, кроме того, заменить перевозку мусора автотранспортом пневматическими системами его удаления из зданий, откуда он будет попадать в централизованные пункты сбора отходов [6].

Транспорт — один из основных источников вредных выбросов в городах, однако весомый вклад в общее загрязнение вносят тепло- и электростанции, промышленные предприятия [7, 8]. Продолжаются споры о целесообразности размещения объектов промышленности в городах, а итоговые решения наверняка будут зависеть от типа организации и параметров производственных площадок. Очевидно, что сохранить свои позиции смогут лишь те производства, которые будут стремиться к нулевым выбросам и обзаведутся системами очистки [9]. При этом предприятия, не способные интегрироваться в новую среду, но играющие важную роль в развитии городской агломерации, станут её спутниками. Наличие источников производства тепла и электроэнергии в городах обусловлено необходимостью устойчивого электроснабжения и производства тепла вблизи объектов потребления. Вынесение источников генерации электроэнергии за пределы поселений технически возможно путём дополнительных инвестиций в сетевую инфраструктуру.

С теплоснабжением дела обстоят сложнее. Централизованное тепло и водоснабжение избавляют от дополнительного оборудования в домах и в случае производства в режиме когенерации повышают КПД работы энергетического сектора: выделяемое тепло направляется на полезное использование, что позволяет исключить дополнительный расход электричества или ископаемых топлив для нагрева воды [10]. В будущем это останется актуальным для населённых пунктов с холодными зимами и высокой долей ископаемых топлив в энергобалансе, но с упором на снижение выбросов за счёт повышения КПД, установки систем очистки и улавливания. Альтернативой служит применение электричества и геотермальной энергии для получения тепла и горячей воды [11]. Расход ископаемых топлив непосредственно в быту (приготовление пищи на газу, нагрев воды) будет снижаться благодаря централизованным решениям и переходу на электричество.

Особое место в городах будущего займут умные системы [12, 13], востребованные во многих сфе-

рах: управление транспортными потоками, освещение, полив и обработка поверхностей от гололёда, диагностика состояния домов и объектов инфраструктуры, регулирование климата в помещениях, контроль за безопасностью, формирование своевременных подсказок и целеуказаний на основе напрямую получаемой информации и предиктивной аналитики для мэрии, специальных и коммунальных служб. С помощью больших данных можно повысить комфорт жизни во всём городе [11]. Цифровые двойники станут хорошим инструментом для обучения, отработки нештатных ситуаций, тестирования оборудования и программного обеспечения до внедрения на объектах. Параметры освещённости и климатические условия в помещении должны регулироваться автоматически и зависеть от наличия людей (включая их перемещение), времени суток и погодных условий [14].

Роботизация многих функций, которые сегодня выполняет человек, — ещё одно достоинство умных городов, способствующее повышению качества жизни. Сюда входят беспилотный транспорт (в том числе доставка), уборка улиц и помещений, уход за растениями (стрижка газона, посев семян, удаление сорняков и пр.), обслуживание в магазинах и пунктах питания, приготовление пищи, оказание банковских и медицинских услуг, контроль и наблюдение с помощью беспилотных летательных аппаратов и наземных роботов, дефектоскопия [15, 16].

Для организации шаговой доступности ключевой инфраструктуры, повышения эффективности использования городского пространства и сокращения территорий, разрезаемых транспортными артериями, требуется целый комплекс решений [17]. Например, в одном комплексе на разных уровнях могут находиться жилые помещения, места для хранения, зелёные зоны, объекты обслуживания (магазины, рестораны, спортивные залы, салоны красоты), паркинги, образовательные учреждения и даже фермы для выращивания растений, при этом транспорт будет двигаться по специальным эстакадам или под землёй. Таким образом, пешеходные потоки во многих зонах не будут пересекаться с автомобильными.

Одна из серьёзных проблем мегаполисов — долгий путь от мест проживания к местам работы. Это влечёт за собой потерю времени, большие стрессовые нагрузки, дополнительные финансовые расходы и повышение вредных выбросов. Часть людей стремится уйти из офисов пораньше не с целью отдохнуть, а чтобы быстрее добраться до дома и поработать в спокойной обстановке. С развитием технологий человеку уже не нужно постоянно присутствовать на рабочем месте — современные телекоммуникации и качественная интернет-связь позволяют удалённо подключаться к рабочим системам, а в скором времени появятся более продвинутые сервисы для дистанционных совещаний [18], где все участники будут пребывать в одном визуальном пространстве (даже

с опцией пошептать с соседом), физически находясь на больших расстояниях друг от друга.

Дистанционная работа в отдельных сферах снизит нагрузку на транспорт в пиковые часы и предоставит населению выбор — остаться в городе или поселиться в частном доме в каком-нибудь красивом месте. Многих от принятия такого решения сейчас останавливают две ключевые проблемы — невозможность выполнять свои трудовые обязанности вдали от рабочей инфраструктуры и ограничение физического снабжения удалённых объектов всем необходимым (тепло, надёжное электроснабжение, Интернет). Благодаря научно-техническому прогрессу работник виртуально интегрируется в рабочий процесс, улучшается жизнеобеспечение отдалённых населённых пунктов, не подключённых к стабильным центральным коммуникациям. Активно разрабатываются системы автономного водоснабжения и водоотведения, технически и экономически доступным стал высокоскоростной Интернет с возможностью резервирования¹. Понятны потребности и в сфере энергоснабжения. Здесь уже каждая семья сможет решить, в каких условиях жить — в городских или загородных. Самое главное, что появляется выбор и практически снимаются два основных препятствующих ему ограничения. Вполне вероятно, что города будут развиваться вместе с зонами-спутниками и формировать расширяющиеся агломерации.

Облик большинства современных городов портят провода (электрические, телефонные, интернет-кабели), которые могут размещаться на специальных опорах и просто между домами и столбами. Нередко они становятся причиной травмирования людей, а произрастающие в непосредственной близости деревья создают угрозу обрывов в случае плохих погодных условий. В некоторых странах километры проводов давно не используются, средства на демонтаж не выделяются, а новые провода добавляются по мере необходимости, лишь усугубляя проблему. В будущем это негативно скажется на функционировании городов. Дело даже не в эстетике, а в помехах для летательных аппаратов (в том числе компактных), критичности нарушения связи и электроснабжения для умных систем. Необходимы контроль и своевременный демонтаж вышедших из строя проводов, перенос нужных проводов в подземные каналы и интеграция в инфраструктурные объекты, а также широкое внедрение беспроводных технологий.

Отличительная черта городов будущего — их высокая автономность при минимальном негативном воздействии на внешнюю среду. Достичь этого можно путём реализации комплекса мер. Во-первых, важно решить одну из главных проблем современ-

¹ Резервирование — это дополнительный путь доступа к сети, который активируется в случае сбоя или отключения основного канала. Оно необходимо, когда отсутствие связи критично для компаний.

ного мира — растущий в геометрической прогрессии объём мусора и увеличение и без того большого количества свалок. Нужны механизмы сортировки, переработки мусора (на отдельных объектах и в местах генерации отходов) и повторного использования продуктов переработки. Во-вторых, обязательным требованием к новым зданиям должна стать их высокая энергоэффективность, включая теплоизоляцию стен, системы рекуперации воздуха, умного управления климатом и освещением в помещениях.

Город может не только потреблять энергию, но и производить её, тем самым повышая свою автономность. Для этого есть несколько способов:

- размещение солнечных батарей на крышах зданий;
- нагрев воды за счёт солнечной энергии;
- установка систем генерации электроэнергии на городских объектах, например в лифтах;
- освоение геотермальной энергии;
- использование биогаза различного происхождения.

Предполагаемые трансформации мегаполисов нуждаются в адаптации подходов к их энергоснабжению.

Изменения в энергоснабжении. Роль энергетики в новых городах будет возрастать, равно как и количество возложенных на неё задач. Энергетика, в свою очередь, будет выдвигать собственные требования к городам и влиять на решения, касающиеся организации жизни. Устойчивость энергоснабжения критически важна в условиях электрификации различных процессов жизнедеятельности и бизнеса, передачи автоматизированным и роботизированным системам части функций обслуживания и управления. Для обеспечения устойчивости нужно:

- расширить мощности линий электропередач и вспомогательного оборудования, включая схемы разноуровневого резервирования;
- обеспечить интеграцию на различных участках мощных электрозарядок;
- применять накопители и создавать условия (в том числе тарифные и регуляторные) для хранения энергии у потребителей;
- использовать умное управление в электросистеме, в частности, для работы с большим количеством распределённых объектов разной мощности, обеспечивающих производство, хранение и потребление энергии;
- внедрять системы умного дома, учитывающие ситуацию в энергосистеме, оптимизирующие нагрузку и одновременно финансовые расходы.

Энергетика вполне может стать элементом многоуровневого планирования. Например, геотермальные тепловые насосы позволяют извлекать энергию с глубины в несколько километров, кры-

ши вполне подходят для размещения солнечных панелей и тепловых баков (для регионов с высокими температурами), а на небольших глубинах могут пролегать подземные линии электропередач и коммуникации систем управления.

Города будут обязаны соблюдать следующие условия:

- максимально возможный перенос спроса на непиковые часы, а при большой доле возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в балансе генерации энергосистемы — синхронизация режимов производства и потребления;
- участие объектов потребления в балансировании нагрузки с помощью накопителей;
- адаптация проектов зданий к размещению генерирующего и стабилизирующего оборудования (солнечные панели, трансформаторы, накопители);
- наличие в градостроительных планах и на инфраструктурных объектах места под прокладку скрытых линий электропередач с соответствующей защитой от природного и техногенного воздействия и ремонтпригодностью.

Для реализации первого и второго пунктов наиболее эффективны методы тарифного регулирования, для второго, третьего и четвёртого — стандарты, нормативы и рекомендации.

В сфере транспорта ужесточатся требования к качеству топлива для двигателей внутреннего сгорания и по снижению расходов, кроме того, будут рассматриваться более экологичные альтернативы. Газомоторный транспорт может оказаться привлекательным для отдельных регионов, однако использование водорода маловероятно из-за его высокой стоимости, взрывоопасности и потерь. С учётом текущего и ожидаемого в ближайшие десятилетия научно-технического прогресса возможно увеличение доли городского электротранспорта, в том числе в сфере малой мобильности и доставки [19].

Появляются уникальные способы повышения энергоэффективности зданий. Уже сегодня такие современные решения, как теплоизоляция, рекуперация, умное управление климатом и освещением, позволяют в разы снизить потребление тепла и электроэнергии и, соответственно, финансовые расходы.

Городские энергосистемы обзаведутся множеством активных потребителей и поставщиков. С одной стороны, это усложнит процесс управления, с другой стороны, отвечает запросам и поддерживает устойчивость снабжения. Например, городской объект является потребителем электроэнергии. Однако при использовании ВИЭ в отдельные часы он уже будет отдавать энергию в сеть. Более гибкими в плане нагрузки могут быть и умные устройства, оптимизирующие дисбаланс спроса. Локальные накопители электромобилей или другого оборудования способны принимать энергию в ночные часы и возвращать свободные остатки в периоды пиков.

Таким образом, неизбежна интеграция отдельных объектов и городских микросетей в существующие электросети. Одновременно появляются новые задачи по управлению и стабильности работы этой сложной системы, её защите от намеренных атак или ошибок операторов, физическому балансированию нагрузки и перетоков. Развитие умных сетей решит проблемы управления и балансирования. Консолидация и обработка больших массивов данных (Big Data) позволят объединить разрозненную информацию с целью принятия оперативных решений и анализа особенностей работы системы. Предиктивная аналитика поможет своевременно находить узкие места и правильно реагировать на изменение обстановки, а цифровые двойники дают возможность тестировать оборудование и программное обеспечение, отрабатывать нештатные ситуации и обучать персонал. Естественно, потребуются весомые инвестиции в сетевую инфраструктуру — не только для внедрения новых систем управления, но и для разнонаправленной передачи больших объёмов электроэнергии, в том числе для резервирования.

Встаёт вопрос о размещении в городе производственных объектов топливно-энергетического комплекса, работающих на ископаемом топливе. Их вынос за пределы мегаполисов освободит ценное пространство и улучшит качество воздуха. Для перерабатывающих предприятий, включая нефтеперерабатывающие заводы, целесообразность размещения вне города очевидна. Электростанции, работающие только на производство электроэнергии, также могут находиться за чертой городов без существенных угроз энергоснабжению. Более сложная ситуация складывается с котельными и объектами когенерации, которые вырабатывают одновременно электрическую и тепловую энергию. Для многих стран, расположенных в тёплом климате, наличие централизованного теплоснабжения и горячего водоснабжения не актуально — достаточно локальных устройств нагрева воды с помощью электричества, солнечной или геотермальной энергии. Для северных территорий обогрев жизненно необходим. Теоретически для этого можно использовать электричество, но, если в основе генерации лежит ископаемое топливо, это приведёт к росту вредных выбросов и расходов потребителей. Именно одновременное производство электроэнергии и тепла позволяет повысить КПД сжигания топлив и работы АЭС. Можно было бы разместить объекты генерации за пределами городов с передачей тепла по трубам, однако эффективность этого способа очень чувствительна к расстоянию. Поэтому рациональное решение зависит от географии и особенностей топливно-энергетического комплекса:

- для стран с тёплым климатом уместны децентрализованные системы нагрева в месте потребления (как правило, на электричестве);

- для холодного климата, где в основе энергоснабжения лежит ископаемое топливо, — когенерация в городах с расчётом на мощность по теплу, остальное — за их пределами; при этом электростанции должны соответствовать самым современным технологиям контроля выбросов (улавливание, фильтрация);

- для стран с холодным климатом, где не используется ископаемое топливо, — обогрев электричеством или котельные, отвечающие требованиям по КПД и выбросам.

Для удалённых объектов (автономное проживание) будут востребованы комплексные решения по энергоснабжению, которые смогут обеспечить стабильное получение электроэнергии и тепла. С каждым годом энергетика предлагает новые решения в этой сфере: сжиженный углеводородный газ, сжиженный природный газ, компримированный (сжатый) природный газ, солнечные панели с накопителями, устройства нагрева воды от солнца, тепловые насосы и т.д. Многие из них имеют свои недостатки, касающиеся надёжности и цены, поэтому будет рационально совмещать их с учётом потребностей конкретного пользователя. Самое главное — сформировать реальные возможности для комфортного проживания в удалённых местах и планомерно повышать их доступность. Удалённость постепенно перестаёт быть ограничением.

Мечты и реальность. В XXI в. было предложено несколько крупных проектов городов будущего, в которых учтены перечисленные выше требования: экологичность (с нулевыми или стремящимися к нулю выбросами), отсутствие пробок и транспортных проблем, комфорт жителей, умные системы обслуживания с высокой автоматизацией и роботизацией, эффективность использования ресурсов, высокий уровень безопасности и др.

Проект The Line в Саудовской Аравии [20] предполагает строительство двух зданий длиной 170 км и высотой 500 м каждое. Они представляют собой протяжённый город шириной 200 м. В основе концепции лежит многоуровневость, за счёт которой должна обеспечиваться шаговая доступность всех необходимых объектов (в пределах 5 минут), отсутствие автотранспорта и перемещение только по железной дороге, позволяющей проехать из конца в конец всего за 20 минут. Высота строений и растения должны создавать тень и более комфортный климат, чем в окружающей пустыне. Заявлено, что выбросы CO₂ будут на нулевом уровне.

В соседних ОАЭ запущен проект города Масдар [21], который позиционируется как первый экогород в мире, в котором вся энергия должна производиться за счёт возобновляемых источников, а отходы полностью перерабатываться. Автомобили будут замещены общественным и персональным автоматическим транспортом (небольшие кабины, курсирующие по специализированной сети). Для

защиты от пустынных ветров предусмотрено строительство высокой стены, а большие искусственные зонты должны давать тень и накапливать энергию для ночного времени.

Желание людей если не жить в окружении природы, то хотя бы приблизить к ней городские условия возникло с самого начала индустриализации. Достаточно вспомнить известный проект А. Гауди “Саграда Фамилия”, в котором основные несущие внутренние элементы напоминают деревья [22]. В настоящее время несколько стран объявили о запуске проектов города-леса, и речь идёт уже не об имитации живой среды, а о её интеграции в повседневность. В частности, в Китае экологичность легла в основу проекта Liuzhou Forest City [23]. На крышах и террасах всех зданий должен быть размещён миллион растений. Согласно расчётам, они будут поглощать 10 тыс. т CO₂ в год, снизят среднюю температуру окружающей среды и увеличат биоразнообразие. Энергетическую автономность обеспечат солнечные панели, а качество воздуха и воды — системы фильтрации и очистки. Весь транспорт будет электрическим. Такому же принципу отвечает концепция малайзийского проекта Forest City [24]. Это будет экологически чистый мегаполис с вертикальным озеленением, системами сбора дождевой воды, использованием солнечной и ветряной энергии [19]. Транспорт будет перемещаться по подземным тоннелям, а улицы останутся свободными. Все эти проекты получили крупное финансирование и по плану должны были быть полностью или частично реализованы к моменту написания данной статьи. Поэтому сейчас мы можем оценить, что получилось на практике.

Проект The Line был пересмотрен через 5 лет после запуска, протяжённость линии сократилась в 71 раз — всего до 2.4 км. Вместе с этим отпала потребность в сверхскоростной железной дороге, а ожидаемая численность населения уменьшилась с 1.5 млн до 300 тыс. человек. Пока первоначальные планы меняются, многие специалисты задаются вопросами: за счёт какой внутренней энергии будет функционировать такой компактный объект с очевидно высоким энергопотреблением, как обеспечить приемлемые климатические условия и освещённость для растений на разных уровнях, насколько экологичными будут строительство и материалы и т.д.?

Проект Масдар реализуется с 2006 г. За это время из заявленных 5 км² застроено менее 30%. Население значительно меньше, чем планируемые к 10-летию от начала строительства 40 тыс. постоянных жителей и 50 тыс. приезжающих на работу. Нулевые выбросы сведены к поддержанию их на низком уровне, а сам город, помимо солнечной, получает энергию из ископаемых источников с соседних территорий. Идея автономности на практике привела к подключению города к коммуникациям Абу-Даби.

От персонального автотранспорта отказаться пока не удалось из-за отсутствия альтернатив, но автомобили с двигателем внутреннего сгорания приходится оставлять на въезде в город.

Малайзийский Forest City возведён лишь частично, и его уже прозвали городом-призраком, где проживают только 9 тыс. человек, вместо 700 тыс. Почти пустые здания, обычные машины на улицах, засохшие без ухода растения. Информация о Liuzhou Forest City ограничивается проектными данными от 2017 г., сведений о продолжении строительства в публичном доступе нет.

Многим городам пришлось пройти непростой путь от амбициозной идеи к практической реализации, однако действительность внесла существенные коррективы. Одно из главных ограничений — стоимость жизни в таком городе и неготовность населения и бизнеса оплачивать услуги по заявленным тарифам, ведь многие из предлагаемых решений значительно дороже традиционных как по затратам на этапе строительства, так и по обслуживанию, а кроме того, не всегда удобны. Например, интересная идея зелёных домов-садов, где растения высаживались бы на разных уровнях снаружи и внутри помещений, на практике привела к нашествию насекомых, грызунов, различных вредителей, появлению сырости, плесени и коррозии. Это не означает, что такие строения заведомо утопичны, но важно детально проработать концепцию с правильным подходом к выбору растений и материалов для стен, отделки и несущих конструкций, количеству и размеру таких зон и системам их обслуживания.

Что касается транспортной нагрузки, то, например, повышение доступности средств малой мобильности, такси и каршеринга снижает потребность в личных авто, но одновременно повышает спрос на перевозки: вместо прогулки до метро пешком люди едут на электросамокатах, доставка товаров многочисленными курьерами исключает поход в ближайший магазин и большие закупки в универсамах, для поездок в зоны с ограниченной парковкой используют каршеринг, а не общественный транспорт, даже в парках вместо обычных велосипедов и самокатов мы всё чаще видим компактный электротранспорт. Идеи создания разноуровневой транспортной инфраструктуры, включая подземную, оборачиваются высокими затратами на строительство и обслуживание, а также необходимостью грамотно увязывать тоннели с другими коммуникациями.

Многие инновационные и амбициозные проекты сталкиваются с постепенной утратой интереса инвесторов, которые начинают осознавать их реальные проблемы. В итоге изначальные задумки получают меньше финансирования и становятся всё более похожи на традиционные города. Значит ли это, что из-за проблем и незавершённых проектов нужно отказаться от идеалистических образов мегаполисов и вернуться к привычным решениям? Ко-

нечно же, нет. Технологически и регуляторно мир ещё не готов ко многим инновациям, и явно не все из них окажутся действительно востребованы обществом. Однако в них очевидно есть потребность, а новые технологические решения приближают нас к образу идеального города, о котором говорилось в начале статьи.

Российская специфика. Наша страна обладает уникальными климатическими, инфраструктурными, экономическими и демографическими особенностями, и хотя власти следуют общемировым тенденциям городского развития, некоторые из них должны быть адаптированы под местные реалии. Обширные территории стимулируют отработку комплекса различных решений. Например, на юге вполне оправданна электрификация транспорта ввиду благоприятных температурных условий для работы аккумуляторов и низкой потребности в обогреве транспортных средств. В южных городах в домах используются автономные электрические системы отопления, а также солнечные панели и нагреватели воды на крышах. При этом самый напряжённый период для энергосистем — лето, когда наблюдается массовый наплыв отдыхающих, полноценно работают отели и вся туристическая индустрия, требующие почти непрерывного кондиционирования. Следовательно, подготовительные и плановые ремонтные работы нужно проводить в другие сезоны. В северных регионах, наоборот, пик нагрузки на энергосистему приходится на зиму. Внедряется когенерация, но с высокими требованиями к технологиям и выбросам.

Технологический прогресс открывает всё больше возможностей для автономного и децентрализованного энергоснабжения. Это важно как для обеспечения энергией удалённых регионов, так и для создания спутниковых зон с широким территориальным охватом и отдельными удалёнными сегментами, где смогут проживать люди, предпочитающие дистанционную работу. Интерес к таким решениям в России заметно возрос после 2019 г. В некоторых регионах на севере и востоке, куда завозится дорогое топливо, экономически эффективно использовать геотермальную и ветряную энергию. Многоуровневое планирование будет необходимо для густонаселённых мегаполисов и центров крупных городов. В небольших населённых пунктах, где стоимость квадратного метра территории не очень высока, такие решения не всегда оправданны.

Согласно прогнозам Росстата и ООН, в России не ожидается существенного прироста населения, поэтому основное внимание будет уделяться развитию уже имеющихся городов. В связи с этим образовался огромный пласт задач по нескольким направлениям энергетики:

- повышение эффективности использования энергоресурсов (модернизация теплосетей, внедрение умных систем управления климатом, переход на

энергоэффективное освещение с датчиками движения, теплоизоляция зданий и реновация устаревших объектов);

- стимулирование потребителей к замене старых бытовых приборов (сравнительный анализ показал, что за 30–40 лет они становятся эффективнее примерно в 2 раза);

- увеличение мощности электросетей и вспомогательного оборудования, в том числе для зарядки электротранспорта, строительство и реконструкция коммуникационных объектов с запасом мощности;

- широкое внедрение технологий умных сетей, больших данных, предиктивной аналитики и цифровых двойников — необходимых элементов устойчивого функционирования будущих электросистем, которые требуют значительного усиления НИОКР по этим направлениям;

- перенос под землю линий электропередач и своевременное проектирование соответствующих каналов в градостроительных планах.

Одна из главных задач для России — создание благоприятных условий для жизни и развития в различных регионах, чтобы избежать концентрации населения исключительно в крупных городах и административных центрах. Этому должны способствовать поддержка и развитие уникальных городских и региональных специфик, включая не только традиционные, но и новые востребованные направления. Они должны совмещать бизнес-проекты с научно-исследовательской деятельностью в этих сегментах. Фактически это распределение территории страны по интересам и профильным специализациям. Особое внимание следует уделять региональной медицине и образованию. Большая роль отводится обеспечению устойчивого, бездефицитного и доступного энергоснабжения путём рационального использования местных ресурсов, в том числе возобновляемых, если это экономически оправданно.

* * *

Реализация инновационных решений, технология которых ещё не стала массовой, неизбежно будет дорогостоящей. Перспективные города требуют крупных внешних инвестиций на этапах строительства и последующего функционирования и платёжеспособного спроса, ведь комфорт стоит дорого. Наиболее вероятно развитие экспериментальных пилотных проектов с дальнейшим внедрением в обычные города тех инноваций, которые окажутся наиболее привлекательными. Приоритетные задачи развития, над которыми нужно работать архитекторам, научному сообществу и бизнесу, можно сформулировать уже сейчас:

- многоуровневое планирование (вертикальный рост городов с использованием подземных уровней и воздушного пространства);

- максимальная энергоэффективность объектов;
- внедрение и повышение эффективности умных систем, комплексов больших данных, предиктивной аналитики и цифровых двойников;
- роботизация систем обслуживания;
- повышение экологичности транспорта и доли перерабатываемых отходов;
- обеспечение высокой мобильности и сокращение потребности в транспорте (концепция шаговой доступности ключевых объектов);
- максимальное использование собственных источников энергии в пределах города (солнечная, геотермальная и т.д.);
- интеграция растительной среды в городское пространство с учётом многоуровневого планирования.

В энергетическом комплексе всё большую актуальность приобретают работы по следующим направлениям:

- внедрение умных систем, к которым будут подключены как крупные электростанции, так и малые объекты генерации (включая ВИЭ в домах), потребители с умным оборудованием и накопителями, операторы хранения, каждый из которых сможет получать оперативную информацию о потребностях системы и тарифах;
- активное использование больших данных, предиктивной аналитики и цифровых двойников, без которых не получится корректно прогнозировать нагрузку, определять узкие места системы, отрабатывать нештатные ситуации и эффективно тестировать оборудование и программное обеспечение;
- интеграция в систему многоуровневого резервирования;
- отработка методов передачи электроэнергии в подземных каналах и на большие расстояния для взаимной страховки энергосистем при расширении использования ВИЭ;
- планирование объектов генерации с учётом тепловой нагрузки и максимального КПД в границах города и выносом ископаемой генерации, не связанной с теплом, за его пределы;
- перенос объектов переработки топлива за черту города;
- продолжение исследований и апробация практического использования локальных источников энергии, исходя из географических особенностей, включая солнечную и подземную геотермальную энергию, биогаз из отходов и т.д.;
- повышение экологических стандартов используемых топлив;
- совершенствование технологий автономного энергоснабжения с выработкой комплексных решений с учётом повышения устойчивости и необходимости резервирования энергии.

Большую роль играют своевременные регуляторные изменения. С помощью тарифов необходимо стимулировать энергосбережение и участие потребителей в оптимизации системной нагрузки. Нормативная база должна обеспечить приём электроэнергии от потребителей в сеть с локального генерирующего оборудования и накопителей. Нормативные требования и стандарты будут во многом определять выбор варианта транспортировки. Утверждение регламентов для ночного обслуживания городов роботизированной техникой (уборка, доставка товаров) и зарядки транспорта позволит снизить дневную нагрузку на транспортную и энергетическую системы.

Многое будет зависеть от развития технологий и их конкурентоспособности. Но уже сегодня мы можем на практике реализовать то, что у жителей мегаполисов пока ассоциируется с городами будущего. Способствовать этому в значительной степени будет согласованность решений по энергоснабжению и планированию. При этом при строительстве новых и планировании развития существующих городов важно заранее позаботиться о гибкости, позволяющей впоследствии интегрировать в них новые решения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Полищук В.Е.* Инновационный урбанизм // Инновации. 2015. № 4 (198). С. 5–9.
2. *Polischuk V.E.* Innovative urbanism // Innovation. 2015, no. 4 (198), pp. 5–9. (In Russ.)
3. *Ben Ali M., Boukettaya G.* Urban Transport Solutions for a Sustainable and Smart Mobility Future: Macro-Environmental Analysis // In book: Smart Cities for Sustainability. Emerald Publishing Limited, 2023. Pp. 49–70.
4. *Сакульева Т.Н., Сотникова В.В.* Роль электро-транспорта в городской транспортной системе // Вестник ГУУ. 2022. № 5. С. 108–114.
5. *Sakulyeva T.N., Sotnikova V.V.* Role of electric transport in urban transportation system // Vestnik Universiteta. 2022, no. 5, pp. 108–114. (In Russ.)
6. *Albatayneh A., Juaidi A., Jaradat M., Manzano-Agugliaro F.* Future of Electric and Hydrogen Cars and Trucks: An Overview // Energies. 2023, vol. 16, 3230.
7. *Pfoser S., Berger T., Putz L.-M. et al.* Hyperloops: New transport mode enabled by the Physical Internet? University of Applied Sciences Upper Austria, 2017. DOI:10.13140/RG.2.2.25830.32328
8. *Dotsenko A.I., Babaev T.K.* Pneumatic transportation of municipal waste – a means of improving the ecology of the city // E3S Web of Conferences. 2023, vol. 403, 04004.
9. *Черногаева Г.М., Жадановская Е.А., Малеванов Ю.А.* Источники загрязнения и качество

- атмосферного воздуха московского региона // Известия РАН. Серия географическая. 2019. № 2. С. 109–116.
- Chernogaeva G.M., Zhadanovskaya E.A., Malevanov Yu.A.* Pollution Sources and Air Quality in the Moscow Region // *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2019, no. 2, pp. 109–116. (In Russ.)
8. Довольская М.Л., Загайнова М.С., Ивлева Т.П. и др. Состояние загрязнения атмосферы в городах России за 2022 г. СПб.: Росгидромет, 2023.
Dovolskaya M.L., Zagainova M.S., Ivleva T.P. et al. The state of atmospheric pollution in Russian cities in 2022. St. Petersburg: Roshydromet, 2023. (In Russ.)
 9. Грушевенко Е.В., Капитонов С.А., Ляшик Ю.А. Анализ конкурентоспособности технологий CCUS: технологическая готовность и экономика // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2023. № 1 (8). С. 158–176.
Grushevenko E.V., Kapitonov S.A., Lyashik Yu.A. et al. CCUS technology competitiveness analysis: technology readiness level and economics // *PROneft. Professionally about Oil*. 2023, no. 1 (8), pp. 158–176. (In Russ.)
 10. Филиппов С.П., Дильман М.Д. Перспективы использования когенерационных установок при реконструкции котельных // Промышленная энергетика. 2014. № 4. С. 7–11.
Filippov S.P., Dilman M.D. Prospects for the use of cogeneration plants in the reconstruction of boiler houses // *Industrial Energy*. 2014, no. 4, pp. 7–11. (In Russ.)
 11. Davies C. Big Data Analytics for Smart Cities // *International Journal of Computing and Engineering*. 2024, vol. 6, pp. 14–29.
 12. Ильина И.Н., Коно М. Трансформация подходов к развитию “умного города”. М.: Изд. дом ВШУ, 2023.
Ilina I.N., Kono M. Transformation of Approaches to “Smart City” Development. Moscow: Publishing House of Higher School of Economics, 2023. (In Russ.)
 13. *Madhee K.* Future of urban architectural design based on the concept of smart city // *Journal of Autonomous Intelligence*. 2023, vol. 7. DOI:10.32629/jai.v7i1.925
 14. *Rani P., Kumari S., Sharma A.* Smart City: A Technological and Sustainable Approach. 2024.
 15. *Alam T., Gupta R., Ahamed N.N. et al.* Smart mobility adoption in sustainable smart cities to establish a growing ecosystem: Challenges and opportunities // *MRS Energy & Sustainability*. 2024, vol. 11, pp. 304–316.
 16. *Mentsiev A., Takhaev U., Mentsiev A.* Digital transformation in transport infrastructure energy efficiency: Smart cities and sustainable mobility // *E3S Web of Conferences*. 2023, vol. 460, pp. 1–5.
 17. *Costa S., Oliveira T., Muller A. et al.* Urban Planning and Accessibility: A Priority Right to Ensure the Well-Being of People in Urbanized Spaces // *Revista de Gestão Social e Ambiental*. 2024, vol. 18, e07480.
 18. *Nanos A., James A.* A Virtual Meeting System for the New Age // *IEEE 10th International Conference on e-Business Engineering, ICEBE*. 2013, pp. 98–105.
 19. Прогноз развития энергетики мира и России 2024 / Под ред. А.А. Макарова и др. М.: ИНЭИ РАН, 2024.
The forecast of the development of the energy industry of the world and Russia in 2024 / Ed. by A.A. Makarov et al. Moscow: ERI RAS, 2024. (In Russ.)
 20. *Oldfield P.* Saudi Arabia’s Thoroughly Iconic, Unsustainable City in the Desert // *The New York Times*. 2024, June 17, section A, p. 19.
 21. *Maghelal P., Li X., Qahtani A.* Evaluating the accessibility of a sustainable city: case study of Masdar city, UAE // *WIT Transactions on the Built Environment*. 2022, vol. 212, pp. 87–96.
 22. *Estévez A., Abdallah Y.* Biodigital design and symbolism in the Sagrada Familia Biodigital Bridge // *World Review of Science, Technology and Sustainable Development*. 2023, vol. 19, pp. 365–382.
 23. *Tandon G.* Smart Forest City, Liuzhou. 2020.
 24. *Avery E., Moser S.* Urban speculation for survival: Adaptations and negotiations in Forest City, Malaysia // *Environment and Planning C Politics and Space*. 2023, vol. 41, pp. 221–239.

CITIES OF THE FUTURE: OPERATING FEATURES AND ENERGY SUPPLY REQUIREMENTS

V.A. Kulagin^{a,*}, D.A. Grushevenko^{a,**}, A.A. Galkina^{a,***}

^aThe Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: vakulagin@ineiran.ru*

***E-mail: grushevenkod@gmail.com*

****E-mail: annegalkina@gmail.com*

Residents of megacities dream of improving the quality of life, environmental conditions, solving transport problems, and improving comfort and safety. Scientific and technological progress opens up opportunities for innovative development of the urban environment. At the same time, energy supply is becoming one of the key elements of the city of the future, because smart robotic systems will depend on its sustainability. The structure of the energy system and the organization of its operation determine energy costs, the amount of harmful emissions, rational methods of heat supply, and the degree of participation of consumer devices in load balancing. The existing projects of such cities have made it possible to test the viability of various solutions in practice and identify a number of limitations and problems. The directions of development of the energy complex listed in the article have identified aspects that need to be addressed today. It is important that the plans include flexibility and the possibility of expansion, which will ensure the introduction of innovations. Proper urban management, in turn, will help to balance the load on the energy system, and therefore reduce the overall cost of energy supply.

Keywords: cities of the future, energy supply, transport, ecology, electricity, smart systems.