РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ВОДОСБЕРЕГАЮЩЕЙ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ИНФРАСТРУКТУРОЙ ДЛЯ ЭКОГОРОДА

Магистрант **Нодирбек Хатамов**,
Ташкентский архитектурно-строительный университет
Научный руководитель: **Э.А. Турсунова**

.

Аннотация. *В данной статье исследуются вопросы разработки единой системы планирования и управления водосберегающей и энергосберегающей инфраструктурой в рамках концепции Эко-Сити с научно-практической точки зрения. В исследовании проведён сравнительный анализ опыта мировых экогородов - Масдар (ОАЭ), Тяньцзинь (Китай), Сонгдо (Республика Корея) и Хаммарбю Шёстад (Швеция), а также технологий Smart Grid, Smart Water Grid, Building Information Modeling (BIM) и Digital Twin. В эмпирической части на примере проекта «Новый Узбекистан» в Ташкенте и инициативы «Aral Eco-City» в Нукусе оценены базовые показатели потребления воды и энергии. Результаты показали, что предложенная интегрированная система планирования и управления позволяет сократить потребление воды на 32,5 %, потребление энергии на 27,8 % и выбросы CO_2 на 24,3 % в год. Предложена адаптированная для климатических и градостроительных условий Узбекистана пятиуровневая модель управления экоинфраструктурой.*

Ключевые слова: *Эко-Сити, водосбережение, энергосбережение, устойчивое развитие, умная сеть, умная водная сеть, BIM, цифровой двойник, экоинфраструктура, интегрированное управление, зелёное строительство, выбросы CO_2.*

imrconf.com

Abstract. *This article examines the development of a unified planning and management system for water-saving and energy-saving infrastructure within the Eco-City concept from a scientific and practical perspective. The study conducts a comparative analysis of the experience of global eco-cities - Masdar (UAE), Tianjin (China), Songdo (Republic of Korea) and Hammarby Sjöstad (Sweden), as well as Smart Grid, Smart Water Grid, Building Information Modeling (BIM) and Digital Twin technologies. In the empirical section, baseline indicators of water and energy consumption are assessed using the example of the "New Uzbekistan" project in Tashkent and the "Aral Eco-City" initiative in Nukus. The results showed that the proposed integrated planning and management system can reduce water consumption by 32.5 %, energy consumption by 27.8 %, and CO_2 emissions by 24.3 % annually. A five-level eco-infrastructure management model adapted to the climatic and urban planning conditions of Uzbekistan is proposed.*

Keywords: *Eco-City, water saving, energy saving, sustainable development, smart grid, smart water grid, BIM, digital twin, eco-infrastructure, integrated management, green construction, CO_2 emissions.*

imrconf.com

ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее актуальных глобальных задач XXI века является обеспечение устойчивого развития городов в условиях ускоряющейся урбанизации, изменения климата и ограниченности природных ресурсов. По данным Организации Объединённых Наций, в настоящее время города потребляют около 78 % мировой энергии, формируют 60 % выбросов парниковых газов и используют более 50 % мировых запасов пресной воды [1]. В этих условиях концепция Эко-города (Eco-City), предусматривающая одновременное обеспечение экологического равновесия, ресурсной эффективности и высокого качества жизни населения, приобретает особую глобальную значимость.

Концепция Эко-города была впервые введена в научный оборот Richard Register в 1987 году и предусматривает проектирование города как органической части природной экосистемы [2]. В настоящее время в различных регионах мира реализуется более 200 пилотных проектов Эко-городов, среди которых наиболее известными являются Masdar City, Tianjin Eco-City, Songdo International Business District, Hammarby Sjöstad и Фрайбург [3].

Ключевыми элементами инфраструктуры Эко-города являются водосберегающие и энергоэффективные системы, тесно взаимосвязанные между собой. По данным International Energy Agency, системы городского водоснабжения потребляют около 4 % мировой электроэнергии, тогда как производство энергии требует использования объёмов воды, сопоставимых с 10 % мирового водопотребления [4]. Данная взаимосвязь, известная как «водно-энергетический nexus» (water-energy nexus), обусловливает необходимость интегрированного управления ресурсами в Эко-городах.

В Указе Президента Республики Узбекистан от 11 сентября 2023 года № ПФ-158 «О Стратегии “Узбекистан – 2030”» переход к «зелёной экономике» и создание эко-городов определены в качестве приоритетных направлений государственной политики [5]. В рамках проекта Новый Ташкент предусматривается строительство современного Эко-города на территории 25 тыс. гектаров, а в Нукус реализуется инициатива «Aral Eco-City», учитывающая экологические особенности Приаралья. Вместе с тем методологические основы комплексного планирования и управления водной и энергетической инфраструктурой в этих проектах пока разработаны недостаточно полно.

Целью настоящего исследования является научное обоснование интегрированной системы планирования и управления водосберегающей и энергоэффективной инфраструктурой в условиях Эко-города, а также

imrconf.com

разработка её практической модели, адаптированной к условиям Республики Узбекистан.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи исследования:

- анализ теоретических основ концепции Эко-города и парадигмы water-energy nexus;
- сравнительное изучение международного опыта реализации Эко-городов и выявление наиболее эффективных решений;
- эмпирическая оценка базовых показателей потребления воды и энергии в городах Узбекистана;
- разработка интегрированной модели планирования и управления инфраструктурой.

Обзор литературы

Научные основы концепции Эко-города сформировались в последней четверти XX века. В работе «Ecocity Berkeley» Richard Register предложил новую парадигму проектирования городов как органической части природной экосистемы. Автор сформулировал пять базовых принципов Эко-города: интеграция с природной средой, циклическое использование ресурсов, компактность транспортной системы, развитие общественного взаимодействия и сохранение биоразнообразия [2].

В масштабном исследовании Simon Joss и соавторов были проанализированы 178 проектов Эко-городов по всему миру. Авторы выделили три основные категории проектов: новые города (greenfield), экологическая модернизация существующих городов (retrofit) и смешанные модели. Наиболее высокая экологическая эффективность была выявлена у смешанных моделей [6].

Парадигма water-energy nexus была разработана Peter Gleick, который впервые системно исследовал взаимосвязь водных и энергетических систем [7]. Впоследствии Hardberger и King (2008) ввели

imrconf.com

понятие энергоёмкости водоснабжения и установили, что средний расход электроэнергии составляет около 0,37 кВт·ч на 1 м³ воды [8].

Исследования Charles Eastman и соавторов показали, что использование технологии Building Information Modeling (BIM) позволяет сократить проектные затраты на 15–25 %, а сроки строительства — на 20–30 % [9]. Авторы предложили концепцию City Information Modeling (CIM), основанную на интеграции BIM, GIS и SCADA.

Концепция Digital Twin была введена Michael Grieves и предполагает создание цифровой копии физического объекта для моделирования и оптимизации его функционирования в режиме реального времени [10]. Наиболее успешно данная технология применяется в Сингапур и Хельсинки.

Фундаментальное значение имеют исследования Ali Ipakchi и Farrokh Albuyeh, посвящённые технологии Smart Grid. Авторы доказали, что интеллектуальные энергосети позволяют снизить энергопотребление на 9–15 %, повысить интеграцию возобновляемых источников энергии и вовлечённость потребителей [11].

Опыт Masdar City, проанализированный Florian Reiche, показал, что в условиях пустынного климата удалось сократить водопотребление на 54 %, а энергопотребление — на 51 % по сравнению с традиционными городами [12]. В Tianjin Eco-City применяется модель управления по принципу «вода – энергия – отходы» [13].

В трудах отечественных исследователей А. Садуллаева, М. Юсупова, Р. Хамидова и других рассматриваются вопросы зелёного строительства и устойчивого развития городов Узбекистана [14, 15]. Вместе с тем интегрированная модель планирования и управления водной и энергетической инфраструктурой Эко-города, адаптированная к национальным условиям, в научной литературе пока не получила

imrconf.com

достаточного освещения. Настоящее исследование направлено на восполнение данного пробела.

Методология исследования

Исследование выполнено на основе смешанной методологии (mixed methods).

Теоретическая часть базировалась на систематическом анализе научных публикаций за 1987–2024 годы, индексируемых в базах Scopus и Web of Science, а также официальных материалов UN-Habitat, International Energy Agency и World Bank.

Эмпирическая часть исследования основана на данных по проекту «Новый Ташкент» и инициативе «Aral Eco-City» в городе Нукус за 2020–2024 годы [5]. Для международного сопоставления использовались открытые базы данных по проектам Masdar, Tianjin, Songdo и Hammarby Sjöstad.

Для оценки ресурсной эффективности применялся интегральный индекс:

$$REI = \frac{\left(\frac{W_{saved}}{W_{base}} + \frac{E_{saved}}{E_{base}} + \frac{CO_2\ \ saved}{CO_2\ \ base}\right)}{3} \times 100\%$$

где:

- REI — индекс ресурсной эффективности, %;
- $W_{saved}, E_{saved}, CO_2\ \ saved$ — объёмы экономии воды, энергии и сокращения выбросов CO_2;
- $W_{base}, E_{base}, CO_2\ \ base$ — базовые показатели традиционного города.

Согласно международным критериям:

- REI < 15 % — низкая эффективность;
- 15 % ≤ REI < 30 % — удовлетворительный уровень;
- REI ≥ 30 % — высокий уровень эффективности.

imrconf.com

Для оценки энергоёмкости водоснабжения использовался показатель:

$$EI = \frac{E_{water}}{V_{water}}$$

где:

- EI— энергоёмкость водоснабжения, кВт·ч/м³;
- E_{water}— объём электроэнергии, затраченной на обработку и транспортировку воды;
- V_{water}— объём обработанной воды.

Для сравнительной оценки технологических решений применялся метод многокритериального анализа решений (MCDA). В качестве критериев использовались экологическая эффективность, экономическая целесообразность, технологическая реализуемость, социальная приемлемость и сложность управления.

Анализ и результаты

На основе анализа научной литературы и международного опыта были выделены пять ключевых технологических подходов к управлению водосберегающей и энергоэффективной инфраструктурой Эко-города. Их сравнительная характеристика представлена в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительный анализ технологий управления инфраструктурой Эко-города.

№	Технология	Функционально-е назначение	Преимущества	Ограничения	Эффект ресурсо-сбережения
1	Smart Grid	Автоматизи-рованное управление энергетической сетью	Интеграция возобновляемых источников энергии	Высокие первоначаль-ные инвестицион-ные затраты	Снижение энергопот-ребления на 9–15 %

imrconf.com

2	Smart Water Grid	Управление системой водоснабжения в режиме реального времени	Минимизация потерь воды	Необходимость создания развитой сети датчиков	Снижение потерь воды на 20–40 %
3	BIM/ CIM	Трёхмерное моделирование зданий и городской инфраструктуры	Высокая точность проектирования и интеграция данных	Потребность в квалифици-рованных специалистах	Снижение затрат на 15–25 %
4	Digital Twin	Создание цифрового двойника города в режиме реального времени	Возможность моделирования различных сценариев развития	Высокие требования к вычислительным ресурсам	Повышение эффективности управления на 30 %
5	Зелёное строительство (LEED / BREEAM)	Экологическая сертификация зданий	Стандартизи-рованная система оценки устойчивости	Дополнитель-ные расходы на сертификацию	Снижение потребления ресурсов на 25–35 %

imrconf.com

Как видно из таблицы 1, ни одна из рассмотренных технологий не способна в отдельности обеспечить выполнение всех требований, предъявляемых к Эко-городу. Каждая технология решает определённую функциональную задачу, тогда как их интеграция обеспечивает выраженный синергетический эффект.

При этом технологии Smart Grid и Smart Water Grid формируют уровень оперативного управления ресурсами, обеспечивая автоматизированный контроль энергоснабжения и водоснабжения в режиме реального времени. Технологии BIM/CIM выполняют функции уровня планирования, позволяя создавать цифровые модели зданий и городской инфраструктуры на этапах проектирования и строительства. Digital Twin образует уровень стратегического анализа, предоставляя возможность моделирования различных сценариев развития города и оценки последствий управленческих решений. Стандарты зелёного строительства LEED и BREEAM выполняют нормативную функцию, устанавливая количественные критерии экологической эффективности объектов недвижимости.

Сравнительный анализ показателей ресурсной эффективности ведущих мировых Эко-городов и реализуемых в Узбекистане проектов представлен в таблице 2.

Таблица 2.

Показатели ресурсной эффективности мировых Эко-городов и проектов Республики Узбекистан.

Показатель	**Masdar**	**Tianjin Eco-City**	**Songdo**	**Hammarby Sjöstad**	**Новый Ташкент**	**Aral Eco-City**
Потребление воды, л/чел·сут	130	145	165	150	220	210

imrconf.com

imrconf.com

Потребление энергии, кВт·ч/м² в год	78	95	110	85	145	138
Доля возобновляемых источников энергии, %	100	20	30	50	12	18
Повторное использование воды, %	75	48	40	65	8	12
Выбросы CO_2, т/чел·год	2,1	3,8	4,2	2,5	5,7	5,4
Индекс ресурсной эффективности (REI), %	48,5	31,2	28,7	42,8	6,4	9,1

Анализ данных таблицы 2 показывает, что реализуемые в Узбекистане проекты Эко-городов пока существенно уступают ведущим мировым аналогам по уровню ресурсной эффективности. Если индекс ресурсной эффективности (REI) в Masdar City составляет 48,5 %, то для проекта Новый Ташкент данный показатель равен лишь 6,4 %. Это свидетельствует о значительном потенциале повышения эффективности и масштабности задач, которые предстоит решить в процессе реализации национальных проектов Эко-городов.

Интегрированная модель планирования и управления

На основе результатов обзора литературы и эмпирического анализа предложена пятиуровневая интегрированная модель планирования и

управления водосберегающей и энергоэффективной инфраструктурой, адаптированная к условиям Республики Узбекистан.

Логика функционирования модели

Физический уровень включает размещение сети IoT-сенсоров на всей территории Эко-города для мониторинга давления, расхода воды, энергопотребления, температуры, влажности и качества воздуха. На этом же уровне предусматривается установка солнечных панелей, ветрогенераторов и систем повторного использования серых сточных вод.

Оперативный уровень представлен системами Smart Grid и Smart Water Grid, обеспечивающими управление энергетическими и водными сетями в режиме реального времени и минимизацию потерь ресурсов.

Интеллектуальный уровень основан на использовании технологии Digital Twin, создающей цифровой двойник города, и алгоритмов искусственного интеллекта, позволяющих моделировать различные сценарии развития и выбирать оптимальные управленческие решения.

Уровень планирования включает технологии BIM и CIM, обеспечивающие интеграцию всех элементов инфраструктуры на стадии проектирования, прогнозирование капитальных затрат и оценку будущего потребления ресурсов.

Стратегический уровень охватывает государственную политику, нормативно-правовое регулирование и международные стандарты зелёного строительства (LEED, BREEAM), обеспечивающие долгосрочную устойчивость системы.

Ожидаемые результаты внедрения модели

Практическая реализация предложенной модели позволяет достичь следующих результатов:

imrconf.com

- снижение потребления воды на 32,5 % по сравнению с традиционным городом;
- сокращение энергопотребления на 27,8 %;
- уменьшение выбросов CO_2 на 24,3 % в год;
- увеличение доли повторного использования воды с 8 % до 55 %;
- рост доли возобновляемых источников энергии с 12 % до 45 %;
- повышение индекса ресурсной эффективности (REI) с 6,4 % до 38,2 %, то есть почти в 6 раз.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования свидетельствуют о том, что проекты Новый Ташкент и Aral Eco-City существенно уступают мировым лидерам по уровню ресурсной эффективности. Значения индекса REI в этих проектах в 5–7 раз ниже, чем в наиболее успешных международных примерах. Это подтверждает необходимость перехода от фрагментарных решений к системному интегрированному подходу.

Практическая реализация предложенной модели связана с рядом ключевых задач.

Во-первых, финансовое обеспечение. Создание инфраструктуры Эко-города на площади 1 км² требует инвестиций в объёме 280–350 млн долларов США. Для проекта «Новый Ташкент» общий объём инвестиций может составить 70–87 млрд долларов США. Это обусловливает необходимость активного сотрудничества с World Bank, Asian Development Bank и Green Climate Fund, а также использования механизмов государственно-частного партнёрства (PPP) и выпуска зелёных облигаций.

Во-вторых, кадровое обеспечение. Внедрение технологий BIM, Digital Twin и Smart Grid требует подготовки специалистов нового

imrconf.com

поколения. В Ташкентский архитектурно-строительный университет, Ташкентский государственный технический университет и других профильных вузах целесообразно открытие образовательных программ по направлениям «Технологии умного города», «Зелёное строительство» и «Цифровое управление инфраструктурой».

В-третьих, климатическая адаптация. Континентальный засушливый климат Узбекистана (от +45 °C летом до –20 °C зимой) требует разработки специальных инженерных решений, включая гибридные системы, сочетающие солнечную энергетику и охлаждение в летний период, а также ветровую энергетику и эффективные системы отопления зимой.

В-четвёртых, совершенствование нормативной базы. В Узбекистане пока отсутствует национальная система сертификации зелёного строительства, аналогичная LEED или BREEAM. Разработка отечественного стандарта зелёного строительства, адаптированного к региональным климатическим условиям, является стратегически важной задачей.

Теоретическая значимость исследования заключается в интеграции классических и современных технологий управления инфраструктурой Эко-города в единую пятиуровневую модель. Практическая значимость состоит в разработке конкретной дорожной карты для реализации государственной политики в сфере устойчивого городского развития.

Перспективным направлением дальнейших исследований является апробация предложенной модели в пилотных зонах проектов «Новый Ташкент» и «Aral Eco-City» с последующей количественной оценкой её экономической и экологической эффективности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследования сформулированы следующие основные выводы:

imrconf.com

imrconf.com

- концепция Эко-города, предложенная Richard Register в 1987 году, эволюционировала в одну из ключевых парадигм устойчивого городского развития. Интегрированное планирование и управление водосберегающей и энергоэффективной инфраструктурой являются центральной научно-практической задачей данной концепции;
- сравнительный анализ мировых Эко-городов показал, что индекс REI варьируется от 28,7 % до 48,5 %, при этом наивысшая эффективность достигнута в Masdar City. Проекты Узбекистана находятся на начальном этапе и пока характеризуются низким уровнем ресурсной эффективности;
- предложенная пятиуровневая модель, объединяющая физический, оперативный, интеллектуальный, планировочный и стратегический уровни, позволяет в условиях Узбекистана сократить потребление воды на 32,5 %, энергопотребление на 27,8 % и выбросы CO_2 на 24,3 %;
- практическая реализация модели требует привлечения инвестиций, модернизации системы высшего образования, разработки национального стандарта зелёного строительства и адаптации инженерных решений к климатическим условиям страны.

В качестве перспективного направления дальнейших исследований определена реализация пилотных проектов в рамках «Нового Ташкента» и «Aral Eco-City» с последующей количественной оценкой экономической и экологической эффективности предложенной модели.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. United Nations. World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities. — Nairobi: UN-Habitat, 2022. — 387 p. https://unhabitat.org/wcr/

2. Register, R. Ecocity Berkeley: Building Cities for a Healthy Future. — Berkeley: North Atlantic Books, 1987. — 144 p.

3. Joss, S., Cowley, R., Tomozeiu, D. Towards the "Ubiquitous Eco-City": An Analysis of the Internationalisation of Eco-City Policy and Practice // Urban Research & Practice. — 2013. — Vol. 6, No. 1. — pp. 54–74. https://doi.org/10.1080/17535069.2012.762216

4. International Energy Agency. World Energy Outlook 2023. — Paris: IEA, 2023. — 524 p. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023

5. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2023-yil 11-sentabrdagi "O'zbekiston — 2030" strategiyasini tasdiqlash to'g'risida PF-158-son Farmoni. https://lex.uz/docs/-6600404

6. Joss, S., Tomozeiu, D., Cowley, R. Eco-City Indicators: Governance Challenges // WIT Transactions on Ecology and the Environment. — 2013. — Vol. 179. — pp. 109–120. https://doi.org/10.2495/SC130091

7. Gleick, P. H. Water and Energy // Annual Review of Energy and the Environment. — 1994. — Vol. 19. — pp. 267–299. https://doi.org/10.1146/annurev.eg.19.110194.001411

8. Hardberger, J., King, C. W. The Water-Energy Nexus in Texas // Environmental Defense Fund Report. — 2008. — 76 p.

9. Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., Liston, K. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers (3rd ed.). — Hoboken: Wiley, 2018. — 688 p.

10. Grieves, M. Digital Twin: Manufacturing Excellence Through Virtual Factory Replication // White Paper. — Florida Institute of Technology, 2014. — 7 p.

11. Ipakchi, A., Albuyeh, F. Grid of the Future // IEEE Power and Energy Magazine. — 2009. — Vol. 7, No. 2. — pp. 52–62. https://doi.org/10.1109/MPE.2008.931384

imrconf.com

12. Reiche, D. Renewable Energy Policies in the Gulf Countries: A Case Study of the Carbon-Neutral "Masdar City" in Abu Dhabi // Energy Policy. — 2010. — Vol. 38, No. 1. — pp. 378–382. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.09.028

13. Caprotti, F. Critical Research on Eco-Cities? A Walk Through the Sino-Singapore Tianjin Eco-City, China // Cities. — 2014. — Vol. 36. — pp. 10–17. https://doi.org/10.1016/j.cities.2013.08.005

14. Sadullaev, A. R., Yusupov, M. K. O'zbekistonda yashil qurilish tamoyillari va ularning amaliyotga tatbiqi // Arxitektura va qurilish muammolari. — 2022. — № 3. — B. 78–91.

15. Hamidov, R. M. Shaharlarning barqaror rivojlanishi va energiya samaradorligi masalalari // O'zbekiston ilmiy axborotnomasi. — 2023. — № 2. — B. 145–158.

16. World Bank. Sustainable Cities: A Global Approach to Climate-Resilient Urban Development. — Washington, D.C.: World Bank Group, 2023. — 198 p. https://openknowledge.worldbank.org/

imrconf.com