

Р. В. Петрук¹
Н. М. Полив'ячук¹
А. С. Омельчук¹
Ю. О. Павлова¹

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПРИРОДООХОРОННИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ СОЦІАЛЬНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ УРБОЕКОСИСТЕМ

¹Вінницький національний технічний університет

Анотація

Сучасні урбанізовані території генерують колосальне антропогенне навантаження на навколишнє природне середовище, що вимагає фундаментального перегляду парадигми їхнього розвитку та функціонування. У цій багаторівневій системі об'єкти соціальної інфраструктури — заклади охорони здоров'я, освітні установи, адміністративні та громадські будівлі — відіграють яскраво виражену подвійну роль. З одного боку, вони є критично важливими інфраструктурними вузлами для забезпечення базової життєдіяльності, надання послуг та підтримки соціальної стійкості населення. З іншого боку, ці об'єкти виступають одними з найбільших системних споживачів енергетичних ресурсів та провідними емітентами парникових газів у глобальному масштабі.

Ключові слова: природоохоронні технології, екологічна безпека, декарбонізація, енергоефективність, соціальна інфраструктура, урбоекосистеми.

Abstract

Modern urbanized areas generate a colossal anthropogenic load on the environment, which requires a fundamental revision of the paradigm of their development and functioning. In this multi-level system, social infrastructure facilities — healthcare facilities, educational institutions, administrative and public buildings — play a clearly expressed dual role. On the one hand, they are critically important infrastructure nodes for ensuring basic life activities, providing services and supporting social sustainability of the population. On the other hand, these facilities are among the largest systemic consumers of energy resources and leading emitters of greenhouse gases on a global scale.

Keywords: environmental technologies, environmental safety, decarbonization, energy efficiency, social infrastructure, urban ecosystems.

Вступ

Сучасні урбанізовані території генерують колосальне антропогенне навантаження на навколишнє природне середовище, що вимагає фундаментального перегляду парадигми їхнього розвитку. Згідно з аналітичними даними, експлуатація будівель відповідає приблизно за 30% світового кінцевого споживання енергії та 26% глобальних викидів, пов'язаних з енергетикою. З них 8% припадає на прямі викиди, а 18% — на непрямі, що виникають внаслідок генерації споживаної електричної та теплової енергії. У цій складній системі об'єкти соціальної інфраструктури (зклади охорони здоров'я, освіти, адміністративні будівлі) відіграють подвійну роль: будучи критичними вузлами життєзабезпечення, вони водночас залишаються одними з найбільших системних споживачів ресурсів.

Урбоекосистема розглядається науковою спільнотою як складноорганізований природно-територіальний комплекс, що керується людиною під постійним впливом міської інфраструктури. Такі системи споживають значні обсяги енергії та води, порушуючи природні біогеохімічні цикли через акумуляцію відходів. Передові підходи до оцінки таких територій базуються на комплексній метриці сталого розвитку (Sustainable Development Gauging Matrix, SDGM) та принципах циркулярної економіки. Важливим аспектом сучасних досліджень є концепція «зеленої інфраструктури» (ЗІ) та впровадження міжнародних стандартів енергоменеджменту, зокрема ISO 50001.

Попри наявність теоретичної бази, сектор соціальної інфраструктури потребує більш радикальних та стрімких змін для відповідності глобальному сценарію чистих нульових викидів до 2050 року (Net Zero Emissions). В умовах України ці виклики загострюються через військову агресію, що спричинила руйнування енергетичних потужностей та дефіцит капіталу. Питання енергонезалежності шкіл та

лікарень трансформується з екологічного тренду в критичний елемент виживання та соціальної стабільності громад.

Метою цієї роботи є проведення глибокого аналізу сучасних природоохоронних технологій, що забезпечують синергію пасивних архітектурних стратегій та активних інженерних систем. У статті розглядається потенціал декарбонізації об'єктів соціальної інфраструктури урбоecosystem, аналізуються результати впровадження інноваційних матеріалів (аерогелів, PCM-матеріалів) та цифрових систем управління (BMS) на прикладі досвіду Вінницької міської громади.

Результати дослідження

Дослідження показало, що досягнення цілей Net Zero Emissions для об'єктів соціальної інфраструктури можливе лише за умови синергетичного поєднання пасивних та активних технологій.

Встановлено, що фундаментом енергоефективності є оптимізація об'ємно-просторового планування. Форма будівлі, максимально наближена до півсфери, мінімізує площу огорожувальних конструкцій та трансмісійні тепловтрати. Експериментальні дані підтверджують ефективність інноваційної теплоізоляції: використання вакуумних ізоляційних панелей (VIP) та матеріалів зі зміною фазового стану (PCM) дозволяє стабілізувати мікроклімат за рахунок акумуляції прихованої теплової енергії.

Впровадження систем автоматизації будівель (BMS), датчиків присутності та технологій daylight harvesting дозволяє радикально скоротити операційне споживання ресурсів. Цифровізація управління енергоменеджментом (ISO 50001) забезпечує адаптивність систем HVAC до реальних потреб користувачів.

Важливим результатом дослідження є обґрунтування ролі «зеленої інфраструктури». Інтеграція зелених дахів та еко-фасадів дозволяє нівелювати ефект міського «теплового острова» (Urban Heat Island) та забезпечує утилізацію дощової води (понад 54 000 літрів щорічно на одну модельну будівлю).

Паралельно з цим, трансформація будівель у «просьюмерів» (prosumers) через інтегровані фотоелектричні системи (BIPV) та використання біоенергетичних установок (технології BIGCC) створює базу для повної декарбонізації енергопостачання муніципалітетів.

Практична імплементація зазначених підходів проаналізована на прикладі м. Вінниця. Ключовими результатами реалізованих проєктів (зокрема у мікрорайонах Тяжилів та вул. О. Антонова) є:

- повна термомодернізація закладів освіти з досягненням класу енергоефективності не нижче «С»;
- диверсифікація джерел теплопостачання через переведення котелень на відновлювану біомасу (деревину);
- розбудова мережі автономної сонячної генерації (2024–2025 рр.), що критично важливо для життєстійкості лікарень в умовах дефіциту потужності в ОЕС України.

Застосування системного підходу дозволяє знизити енергоємність соціальних об'єктів більш ніж у 10 разів, перетворюючи їх з центрів емісії на вузли екологічної та енергетичної стабільності урбоecosystem.

Висновки

Об'єкти соціальної інфраструктури (освітні, медичні та адміністративні заклади) в межах гетеротрофних урбоecosystem володіють значним потенціалом для макроекологічної декарбонізації. Впровадження комплексних енергоефективних заходів дозволяє перетворити ці об'єкти з енергоємних споживачів на активні вузли сталого розвитку.

Доведено, що найбільша ефективність (зниження питомого споживання первинної енергії на 93,29%) досягається шляхом поєднання пасивних архітектурних стратегій (оптимальне планування, використання аерогелів, VIP та PCM-матеріалів) з активними інтелектуальними системами управління (BMS). Автоматизація на основі датчиків присутності та адаптивне керування освітленням і HVAC-системами забезпечують кардинальне скорочення емісії парникових газів.

Інтеграція зеленої інфраструктури (зелені дахи, еко-фасади) безпосередньо в архітектуру будівель є ключовою для адаптації міст до кліматичних змін. Ці рішення не лише покращують термодинамічні показники споруд, а й вирішують критичні проблеми урбоecosystem: нівелюють ефект міського «теплового острова», забезпечують ефективний менеджмент зливових вод та підтримують біорізноманіття.

Інвестиційна стратегія «від найгіршого до першого» (Worst-to-First) демонструє найвищий мультиплікативний ефект. Встановлено, що в медичній сфері кожний долар заощаджених на енергії коштів здатен генерувати до 20 доларів нового доходу закладу за рахунок перерозподілу ресурсів на лікувальні потреби.

Кейс Вінниці підтверджує, що системна термомодернізація із залученням міжнародної допомоги та перехід на відновлювану енергетику (біомаса, сонячна генерація) є дієвим механізмом зміцнення життєстійкості громад. В умовах воєнних загроз така енергонезалежність стає фактором національної безпеки.

Стратегічний шлях післявоєнної відбудови України має базуватися на принципах циркулярної економіки та біосферосумісності. Необхідна повна цифровізація енергомоніторингу (системи EMIS), створення прозорих еко-фондів та адаптація законодавства до стандартів ЄС. Це дозволить створити урбоекосистеми нового покоління, здатні самостійно протистояти енергетичним та кліматичним викликам майбутнього.

Петрук Роман Васильович — д.т.н., професор, професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: prroma07@gmail.com.

Полив'ячук Наталія Миколаївна — аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: polyviancyuknm@gmail.com.

Омельчук Артур Сергійович — студент групи ТЗД-216, факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: omelchukas@gmail.com

Павлова Юлія Олександрівна — студентка групи ЕКО-246, факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: pavlova03jyla@gmail.com

Petruk Roman Vasyliovych — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: prroma07@gmail.com.

Polyv'yanchuk Natalia Mykolaivna — Postgraduate Student of the Department of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: polyvianchuknm@gmail.com.

Omelchuk Artur Serhiyovych — Student of the TZD-21b group, Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: omelchukas@gmail.com

Pavlova Yulia Oleksandrivna — Student of the ECO-24b group, Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: pavlova03jyla@gmail.com