

УДК 697.7:631.234:620.92

аспірант Сергій Морковник,

[s.morkovnyk@gmail.com](mailto:s.morkovnyk@gmail.com), ORCID: 0009-0003-9662-1951,

д.т.н., проф. Віктор Мілейковський,

[mileikovskiy.vo@knuba.edu.ua](mailto:mileikovskiy.vo@knuba.edu.ua), ORCID: 0000-0001-8543-1800,

Київський національний університет будівництва і архітектури

<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.57.135-155>

## ОГЛЯД СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ФОРМУВАННЯ МІКРОКЛІМАТУ ІНТЕГРОВАНИХ ТЕПЛИЦЬ У СКЛАДІ БУДІВЕЛЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ВТОРИННИХ І ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

**Анотація.** У статті узагальнено сучасні підходи до формування мікроклімату інтегрованих теплиць у складі будівель з акцентом на використання вторинних і відновлюваних джерел енергії. На основі аналізу 32 наукових публікацій систематизовано типи сполучення «будівля-теплиця», механізми енергетичної взаємодії та інженерні стратегії керування мікрокліматом. Показано, що вторинні ресурси охоплюють теплопередачу крізь спільні огорожувальні конструкції, а також утилізування теплоти витяжного повітря, застосування якої потребує дотримання санітарно-гігієнічних вимог, оцінювання ризиків якості повітря (indoor air quality, IAQ) і визначення вимог до фільтрування. Сонячна радіація розглянута як двофункціональний чинник – джерело теплових надходжень і основа світлового режиму у зоні рослин, що зумовлює необхідність комплексного оцінювання та узгодження з режимами вентиляції й сонцезахисту. Методично найбільш інформативними є щогодинне енергетичне моделювання будівлі (building energy simulation, BES) і ко-симуляція, доповнені CFD (computational fluid dynamics) та оптимізаційними підходами керування (model predictive control, MPC) і валідуванням за результатами вимірюваннями. Узагальнено показники ефективності, що передбачають енергетичні, мікрокліматичні та екологічні метрики (life-cycle assessment, LCA), логістичні ефекти та сценарії енергоспоживання.

**Ключові слова:** мікроклімат, дахові теплиці, будівельно-інтегроване землеробство, вторинні джерела енергії, сонячна радіація, якість повітря, енергомоделювання, оцінка життєвого циклу.

**Ставлення проблеми.** Залучення споруд захищеного ґрунту (теплиць) до складу будівель (дахові та вбудовані теплиці) розглядається як один із практичних інструментів міського землеробства та підвищення ресурсної ефективності міської інфраструктури. У сучасній літературі цей напрям описується через концепції “дахова теплиця” (rooftop greenhouse, RTG),

“інтегрована дахова теплиця” (integrated rooftop greenhouse, iRTG), “інтегрована в будівлю дахова теплиця” (building-integrated rooftop greenhouses, BiRTG) та ширше – “будівельно-інтегроване землеробство” (building-integrated agriculture, BIA), що охоплює різні рівні взаємодії теплиці з будівлею за енерго- та масообміном [1–4]. Практичні конфігурації залучення теплиць до будівель охоплюють як «надбудови» з обмеженою взаємодією потоків, так і рішення із обміном теплотою та повітрям, де теплиця стає частиною енергетичної системи будівлі [5, 6].

**Актуальність дослідження.** Актуальність досліджень у цій сфері зумовлена необхідністю скорочення енергоспоживання та викидів у будівельному секторі, зокрема в частині опалення й охолодження, які визначають значну частку кінцевого споживання енергії. Утилізація вторинних енергоресурсів будівель (низькопотенціальні теплові потоки, теплота вентиляційних викидів) і раціональне використання сонячної енергії потенційно дозволяють знизити питомі енерговитрати на підтримання мікроклімату теплиці з одночасним обмеженням небажаного надходження теплоти до будівлі влітку та пов’язане з цим зростання навантажень на кондиціонування повітря [7–9].

**Останні дослідження та публікації.** Дослідження інтегрованих теплиць у складі будівель охоплюють різні аспекти – від конструктивних рішень до керування мікрокліматом і оцінки життєвого циклу. Тому для систематизування результатів огляду проаналізовані публікації згруповано за переважною тематикою та дослідницьким фокусом. Критеріями групування стали тип поєднання теплиці з будівлею, характер енергетичних і масообмінних потоків, застосовані інженерні рішення формування мікроклімату, методи моделювання/валідування та показники ефективності. Такий підхід дає змогу зіставити результати різних досліджень і виокремити повторювані закономірності та ключові відмінності.

**Група 1. Типологія інтегрованих теплиць у сфері міського землеробства (BIA/RTG/iRTG/BiRTG).** У наукових публікаціях останніх років систематизуються ключові поняття та підходи до класифікації інтегрованих теплиць як компонента міського землеробства. Ранні роботи розглядають BIA та дахове вирощування як спосіб ефективнішого використання дахів і підвищення сталості міської інфраструктури [1, 2]. Подальші систематичні огляди узагальнюють досвід впровадження RTG/iRTG/BiRTG в умовах різного клімату та підкреслюють бар’єри і передумови масштабування [3, 4, 10].

**Група 2. Енергетична взаємодія «будівля-теплиця» та вплив на енергоспоживання будівлі.** Ключовим напрямом є енергетична взаємодія, у межах якої теплиця розглядається як елемент перерозподілу потоків у системі

«будівля–теплиця» [7, 9]. Динамічні моделі показують, що величина ефекту є сценарно-залежною, а літні ризики перегрівання можуть визначати потребу в охолодженні та вентиляції [8, 11, 12]. У холодний період у низці робіт відзначається потенціал зниження теплових втрат крізь покрівлю за рахунок “теплого буфера”, який формує теплиця над верхніми приміщеннями. Однак масштаб ефекту залежить від характеристик огорожень та режимів керування [9, 13]. Також підкреслюється, що коректне оцінювання потребує щогодинного моделювання і валідування за результатами вимірюваннями, оскільки припущення щодо повітрообміну та керування можуть суттєво змінювати результати [8, 13].

**Група 3. Вторинні джерела ресурсів у системі «будівля-теплиця»: теплопередача та теплота витяжного повітря.** Вторинний енергетичний потенціал у системі «будівля-теплиця» формує теплопередача крізь спільні огорожувальні конструкції (покрівельне перекриття, вузли примикання), а також вплив теплиці на тепловий стан даху як елемента огороження будівлі. Динамічні енергетичні моделі та спільне симулювання показують, що величина цього ефекту визначається ступенем залученості та режимами керування і може відчутно впливати на теплові навантаження теплиці та будівлі, особливо в опалювальний період [8, 9, 13, 14]. Витяжне повітря будівель є потенційним носієм теплоти й CO<sub>2</sub> для фотосинтезу, однак його використання повинно враховувати санітарно-гігієнічні обмеження [15, 16]. Активні схеми вентиляції можуть підсилювати спільні вигоди між теплицею та будівлею, але потребують обґрунтування додаткових енерговитрат і режимних обмежень [6].

**Група 4. Відновлювані джерела енергії: світлове забезпечення та теплові надходження від сонячної радіації.** Сонячна енергія визначає як тепловий баланс, так і світлове забезпечення. У літературі підкреслюється вирішальна роль оптики огорожень, геометрії та орієнтації, оскільки оптичні втрати здатні обмежувати продуктивність [17, 18]. Оптимізація сонячних надходжень має виконуватися разом із керованими засобами сонцезахисту та вентиляції, щоб забезпечити прийнятний компроміс між світловим режимом і ризиком перегрівання [11, 12, 17].

**Група 5. Керування мікрокліматом: режими вентиляції, фільтрування та вимоги до якості повітря (indoor air quality, IAQ).** Публікації цього напрямку розглядають керування температурно-вологісним режимом і концентрацією CO<sub>2</sub> як багатофакторну задачу, у якій ключову роль відіграють режими вентиляції, робота екранів/сонцезахисту та координування з інженерними системами будівлі [13, 19, 20]. Окремо наголошується, що використання повітряних потоків, пов’язаних із будівлею, потребує врахування санітарно-гігієнічних обмежень, вимог до якості повітря та фільтрування, а

також запровадження обмежень режимів подавання повітря й перетікання між різними зонами [6, 15, 16]. Як інструменти узгодження енерговитрат і мікрокліматичних критеріїв розглядаються оптимізаційні підходи, зокрема модельно-прогнозне керування (model predictive control, MPC), що дозволяє формалізувати компроміс між енергоефективністю та дотриманням цільових параметрів мікроклімату за наявності обмежень [19, 20].

**Група 6. Екологічне та комплексне оцінювання: життєвий цикл, логістика, сценарії енергоспоживання.** Публікації з оцінюванням життєвого циклу (life-cycle assessment, LCA) та логістичним аналізом показують, що екологічний ефект залежить від матеріалів огорожень, режимів експлуатації та сценарію постачання продукції. Окремо наголошується на вирішальній ролі вибору меж системи та вихідних даних, оскільки залучення або незалучення енерговитрат на підтримання мікроклімату, пакування або втрат продукції може суттєво змінювати порівняльні висновки [21, 22]. Частина робіт розглядає поєднані комплекси «будівля-теплиця» у ширших сценаріях енергоспоживання та керування енергією будівлі. У таких ставленнях важливими стають щогодинні профілі навантажень і узгодження режимів роботи теплиці з режимами будівлі, оскільки саме керування визначає сумарний енергетичний і вуглецевий ефект системи [23, 24].

**Формулювання цілей статті.** Метою статті є узагальнення сучасних підходів до формування мікроклімату інтегрованих теплиць у складі будівель із фокусом на енергетичну взаємодію «будівля–теплиця», утилізацію вторинних джерел енергії (теплопередача крізь спільні огорожувальні конструкції та теплота витяжного повітря) і використання відновлюваних джерел енергії (сонячна радіація як чинник світлового режиму та теплових надходжень), а також систематизація технічних рішень, методів оцінювання й показників ефективності.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

1. Класифікувати типи інтегрованих теплиць у сфері міського землеробства (BIA/RTG/iRTG/BiRTG) і варіанти їхньої взаємодії з будівлею;
2. Узагальнити підходи до оцінювання енергетичної взаємодії «будівля-теплиця» та її впливу на енергоспоживання будівлі;
3. Узагальнити підходи до утилізації вторинних джерел енергії в системі «будівля-теплиця», зокрема теплопередачі та теплоти витяжного повітря;
4. Узагальнити підходи до використання відновлюваних джерел енергії – сонячної радіації – для формування світлового режиму та теплових надходжень;
5. Систематизувати стратегії керування мікрокліматом, зокрема режими вентиляції, фільтрацію та вимоги до якості повітря (indoor air quality,

IAQ);

6. Узагальнити підходи до екологічної та комплексної оцінки інтегрованих теплиць, зокрема оцінювання життєвого циклу (LCA), логістичні ефекти та сценарії енергоспоживання;
7. Проаналізувати методи дослідження та валідування, що застосовуються в цій тематиці (BES, ко-симулювання, CFD, MPC), а також узагальнити ключові показники ефективності (Key Performance Indicators, KPI) і типові обмеження, на які вказують автори.

**Метод дослідження.** Огляд виконано на основі 32 наукових публікацій, присвячених тематиці дахових теплиць, з акцентом на взаємодію з інженерними системами будівель та використання вторинних і відновлюваних джерел енергії. Застосовано підхід структурованого оглядового узагальнення з елементами систематизування (тематичне кодування, порівняльна матриця характеристик). Для кожної роботи узагальнювали відомості про тип залучення, джерела енергії, стратегії формування мікроклімату, методи дослідження, ключові метрики, а також основні висновки й обмеження. Для систематизації результатів огляду публікації згруповано за переважною тематикою та дослідницьким фокусом. Після цього виконано порівняльний синтез повторюваних закономірностей і типових компромісів між енергетичними витратами та якістю мікроклімату.

**Типологія інтегрованих теплиць у сфері міського землеробства (RTG/iRTG/BiRTG).** У розглянутих джерелах виділено ключові терміни та критерії класифікування інтегрованих теплиць у сфері міського землеробства. Зазвичай виділяють дахові теплиці (RTG), інтегровані дахові теплиці (iRTG) або інтегровані в будівлю дахові теплиці (BiRTG), які різняться ступенем конструктивної та інженерної взаємодії з будівлею [1, 3, 5]. Для RTG характерна “надбудова” на даху, де теплиця розглядається як відносно автономний об’єм, а взаємодія з будівлею обмежується переважно конструктивними та теплотехнічними зв’язками крізь покрівельне перекриття [10, 11]. У підходах iRTG/BiRTG взаємодія посилюється: теплиця розглядається як елемент, що може бути залучений до енергетичних і повітрообмінних схем будівлі (через контрольовані теплові/повітряні зв’язки, теплоутилізацію, керування потоками) [6, 14, 25].

Класифікація в багатьох роботах спирається не лише на “назву типу”, а на ознаки залученості, які визначають реальну поведінку системи:

1. Наявність/відсутність спільних огорожень та теплових мостів;
2. Можливість контрольованого повітрообміну між об’ємами;
3. Спосіб використання вторинних ресурсів (теплопередача, вентиляційні викиди, внутрішні надлишки теплоти);

4. Наявність активних систем керування та їхні режими [7, 9, 14].

Саме ці ознаки формують набір технічних обмежень і потенційних вигод, що пояснює відмінність результатів у різних випадках навіть для схожого клімату.

Окрема група публікацій підкреслює, що вибір типу залученості визначається умовами експлуатування будівлі (розподіл теплових навантажень, графік роботи, режим експлуатування вентиляційних систем) та конструктивними можливостями даху (носійна здатність, допустимі висоти, доступ до інженерних систем), а також нормативними вимогами щодо безпеки та якості повітря [10, 15]. Практична реалізація інтегрування часто вимагає компромісу між “максимальною енергетичною взаємодією” і надійністю/керованістю мікроклімату: більший ступінь зв’язку з будівлею потенційно збільшує доступ до вторинних ресурсів, але також підвищує чутливість до режимних змін у будівлі та ризики неконтрольованих перетікань (теплота/волога/домішки) [6, 13, 15].

У методичному плані типологія в багатьох роботах супроводжується переходом від описових класифікацій до кількісних критеріїв, які можна перевірити моделлю або вимірюваннями: енергетичні баланси, щогодинні профілі навантажень, часові частки перебування параметрів мікроклімату в цільових діапазонах, а також інтегральні екологічні метрики в рамках LCA [8, 14, 21, 22]. Це створює основу для порівняння альтернатив залученості “на рівних умовах”, однак багато авторів окремо наголошують на необхідності прозорих припущень (геометрія, огороження, режими вентиляції/керування), інакше пряме зіставлення результатів між роботами є обмеженим [8, 13, 26].

**Енергетична взаємодія «будівля-теплиця» та вплив на енергоспоживання будівлі.** У розглянутих дослідженнях енергетична взаємодія «будівля-теплиця» трактується як сукупність процесів тепло- та масообміну, крізь які інтегрована теплиця може змінювати потребу будівлі в опаленні та охолодженні, а також величину пікових навантажень систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря. Найчастіше наголошується, що теплиця впливає на енергоспоживання будівлі двома основними шляхами:

1. Тепловий потік крізь покрівлю;
2. Керовані інженерні зв’язки (організований повітрообмін, теплоутилізація, узгоджені режими роботи) [7, 9, 14, 25].

При цьому знак і величина ефекту залежать від ступеня залученості, характеристик огорожувальних конструкцій, режимів роботи систем вентиляції та керування ними, а також від кліматичних умов і сезонності [11–13].

У холодний період у багатьох роботах відзначається потенціал зниження

теплових витрат будівлі завдяки тому, що теплиця може працювати як тепловий буфер над верхніми приміщеннями: зменшується різниця температури на покрівлі та скорочуються тепловтрати крізь дах, особливо за наявності нічних екранів/тепозавіс і керованої вентиляції [7, 9, 13]. В інтегрованих конфігураціях додатковий ефект може формуватися через використання низькопотенціальних ресурсів будівлі (вентиляційні викиди, внутрішні надлишки теплоти), що впливає на сумарні витрати енергії системи «будівля-теплиця» [14, 23, 25]. Разом з тим, автори підкреслюють чутливість результатів до припущень щодо режимів керування та фактичних витрат повітря: без узгоджених режимів перетікання теплоти й вологи можуть змінювати очікуваний ефект або знижувати його відтворюваність [8, 13].

У теплий період ключовим фактором стає ризик перегрівання теплиці та пов'язані з цим додаткові теплонадходження до будівлі крізь перекриття або інженерні зв'язки. Динамічні симуляції та сценарні дослідження показують, що для отримання позитивного балансу необхідні режими, які обмежують небажане передавання надлишкової теплоти до будівлі (сонцезахист, екрани, інтенсивна вентиляція/нічне провітрювання, коректні налаштування повітрообміну та «байпасні» режими) [11–13]. У роботах, де аналізуються різні сценарії експлуатування (зокрема режими охолодження/провітрювання), підкреслюється, що сезонна ефективність інтеграції визначається саме узгодженням керування теплицею з режимами роботи систем підтримання мікроклімату будівлі та часовими змінами навантажень [11, 12, 23].

Методично більшість авторів оцінюють вплив інтегрованої теплиці на енергоспоживання будівлі за допомогою щогодинного енергетичного моделювання будівлі (building energy simulation, BES) та/або ко-симуляції «будівля-теплиця», що дозволяє врахувати мінливість погоди, сонячної радіації, вентиляційних режимів і сценаріїв керування [13, 14, 25]. Узагальнений висновок цієї групи робіт полягає в тому, що залучення теплиці може зменшувати річні та/або пікові енергетичні потреби будівлі, але результат є суттєво сценарно-залежним і потребує коректного опису огорожень, повітрообміну та керування для отримання відтворюваних оцінок [7, 9, 13].

**Вторинні ресурси в системі «будівля-теплиця»: теплопередача, теплота та вуглекислий газ у витяжному повітрі.**

У розглянутих публікаціях вторинні джерела енергії для інтегрованих теплиць описуються як низькопотенційні теплові ресурси, що утворюються під час експлуатації будівель і можуть бути використані для покриття частини теплових потреб теплиці. Такими ресурсами є теплопередача крізь спільні огорожувальні конструкції (покрівельне перекриття, вузли примикання, локальні теплові мости), а також теплота витяжного повітря (вентиляційних

викидів) і пов'язані із ним потоки теплоти та маси [7, 9]. На відміну від відновлюваних джерел, вторинні ресурси мають, як правило, керований або умовно керований характер: їхня доступність і корисність визначається режимами роботи будівлі (вентиляція, графіки роботи, внутрішні теплонадходження) і конфігурацією комплексу «будівля-теплиця» [13, 14].

Теплопередача крізь огорожувальні конструкції є базовим (пасивним) компонентом вторинного ресурсу. У випадку дахового та інтегрованого розміщення теплиця змінює тепловий стан покрівельного огороження і тим самим впливає на потоки теплоти між внутрішнім об'ємом будівлі та довкіллям. Динамічні моделі та ко-симуляційні підходи показують, що величина ефекту визначається теплотехнічними властивостями перекриття, площею контакту та режимами керування мікрокліматом теплиці (вентиляція, екрани/сонцезахист, нічні режими) [13, 14, 25]. У холодний період теплиця може працювати як буферний шар, що зменшує різницю температури на покрівлі та частину тепловтрат, тоді як у теплий період без адекватного відведення надлишкової теплоти можливі небажані теплонадходження до будівлі й підвищення потреби в охолодженні приміщень верхніх поверхів [11, 12]. Важливо, що саме спільні вузли й локальні теплові мости можуть визначати як енергетичний ефект, так і ризики конденсації та інших проблем з вологою у покрівельних конструкціях, тому для коректної оцінки в ряді робіт застосовуються гігротермічні підходи та калібрування моделей [13, 14].

Теплота витяжного повітря розглядається як вторинний ресурс із потенційно вищою “керованістю”, оскільки її можна утилізувати завдяки організованому повітрообміну або як низькопотенціальне джерело для теплового насоса. У частині робіт витяжне повітря подається в теплицю (або використовується в теплообміннику) для перенесення теплоти, а також розглядається можливий агрономічний ефект від підвищення концентрації CO<sub>2</sub> [6, 16]. Разом з тим, автори підкреслюють, що використання витяжного повітря обмежується санітарно-гігієнічними вимогами та ризиками якості повітря (домішки, аерозолі, запахи), які можуть бути критичними для стабільної та безпечної експлуатації. Тому практична реалізація таких схем потребує визначення вимог до фільтрування, контрольованих режимів подавання та обмежень щодо джерел повітря (залежно від призначення приміщень будівлі) [6, 15, 16].

Окремо розглядаються активні вентиляційні схеми, які можуть підсилювати енергетичні переваги інтеграції шляхом збільшення перенесення теплоти між підсистемами, однак водночас потребують оцінювання додаткових енерговитрат на переміщення повітря та узгодження з режимами керування мікрокліматом [6]. У таких рішеннях корисність вторинного ресурсу

визначається компромісом: збільшення повітрообміну може покращувати тепловий баланс у холодний період, але в теплий період підвищувати ризик перегрівання або збільшувати потребу у вентиляції/охолодженні, якщо не застосовано сонцезахист і відповідні режимні обмеження [11, 12].

Загалом літературні джерела зазначають, що вторинні джерела енергії є суттєвим резервом підвищення енергоефективності інтегрованих теплиць, однак їхній ефект є сезонно та сценарно залежним і має оцінюватися разом із обмеженнями якості повітря та стратегіями керування мікрокліматом. Саме тому більшість досліджень обґрунтовує рішення на основі щогодинних моделей (BES/ко-симуляція) та/або валідування за результатами вимірювання, щоб забезпечити відтворюваність висновків для конкретних умов експлуатування [8, 13, 14].

### **Відновлювані джерела енергії: світлове забезпечення та теплові надходження від сонячної радіації.**

Сонячна радіація є базовим відновлюваним ресурсом для теплиць і визначає одночасно теплові надходження та світловий режим у зоні рослин. На відміну від більшості будівельних задач, де сонячні надходження переважно оцінюють як приплив теплоти, для теплиць вони мають подвійну роль: частина випромінювання перетворюється на теплоту в повітрі, ґрунті та огороженнях, а частина формує світлове середовище, від якого залежить фотосинтетична активність і продуктивність культур. Тому в публікаціях наголошується, що оцінювання сонячної енергії має бути комплексним і враховувати баланс між енергетичними вигодами та вимогами світлового забезпечення [17, 18].

Вирішальними факторами використання сонячної енергії є оптичні характеристики огорожень, геометрія та орієнтація теплиці. Автори підкреслюють, що оптичні втрати (пропускання, відбиття, поглинання), забруднення поверхонь, наявність носійних елементів і додаткових шарів (екрани, завіси) можуть суттєво зменшувати корисний потік випромінювання, який потрапляє на верхній шар листяного покриву. У результаті навіть за достатніх теплових ресурсів продуктивність може обмежуватися саме недостатнім світловим потоком, що підтверджується результатами досліджень продуктивності інтегрованих дахових теплиць у реальних умовах [17]. Водночас геометричні рішення (кут і площа світлопрозорих огорожень, висота та конфігурація несвітлопрозорих ділянок) формують як рівномірність освітлення, так і інтенсивність надходжень теплоти в різні сезони, що потребує узгодження з режимами вентиляції й керування [11, 18].

Окремий аспект, який повторюється в роботах різних авторів, – це компроміс між прагненням до вищої інтенсивності освітлення та ризиком перегрівання. Збільшення пропускання і площі світлопрозорих огорожень

покращує доступ рослин до сонячної радіації, проте може підвищувати температуру повітря й конструкцій у теплий період, що збільшує потребу в інтенсивному відведенні надлишкової теплоти. Тому оптимізування сонячних надходжень у практичних рішеннях, як правило, супроводжується застосуванням керованих засобів сонцезахисту (екрани, затінення) і вентиляційних режимів, спрямованих на запобігання перегрівання та збереження стабільного температурно-вологісного режиму [12, 17]. У низці робіт підкреслюється, що сезонна ефективність теплиці в значній мірі визначається саме тим, наскільки керування здатне “роз’єднати” бажану світлову складову від небажаної теплової надлишковості в окремі періоди [11, 12].

На рівні методів оцінювання сонячної складової переважають поєднання розрахунків радіаційних надходжень із щогодинним енергетичним моделюванням та сценарним аналізом режимів експлуатування. Системні роботи щодо проектування дахових рішень у міському середовищі розглядають сонячний ресурс разом з енергетичними й просторовими обмеженнями та зв’язком між продовольством, енергією та землею (food-energy-land nexus), що дозволяє зіставляти можливі варіанти (наприклад, різні типи дахового використання) у задачах із кількома критеріями оцінювання [27]. Такі підходи підкреслюють, що для інтегрованих теплиць сонячна енергія має оцінюватися не ізольовано, а в сукупності з тепловими потоками між теплицею й будівлею, режимами вентиляції та системою керування мікрокліматом, оскільки саме ці зв’язки визначають реальний енергетичний і технологічний результат [11, 18].

**Керування мікрокліматом: режими вентиляції, фільтрування та вимоги до якості повітря (indoor air quality, IAQ).**

У публікаціях, присвячених інтегрованим теплицям у складі будівель, керування мікрокліматом розглядається як багатофакторна задача, де необхідно одночасно забезпечити цільові діапазони температури, вологості та концентрації CO<sub>2</sub>, зберігаючи енергоефективність і керованість режимів. Ключову роль у досягненні стабільних параметрів повітряного середовища відіграють режими вентиляції (природної або механічної), а також керовані елементи, що впливають на теплові й масообмінні процеси (екрани, сонцезахист, нічні режими), які мають бути узгоджені з інженерними системами будівлі [13, 19, 20]. У багатьох роботах підкреслюється, що саме вентиляція одночасно виконує кілька функцій: відведення надлишкової теплоти, регулювання вологісного режиму (зокрема запобігання конденсації) та формування концентрацій CO<sub>2</sub>, а тому її параметри є одним з головних “важелів” керування мікрокліматом [13, 19].

Особливістю інтегрованих систем є можливість використання повітряних

потоків, пов'язаних із будівлею, зокрема витяжного повітря, що може містити корисну для теплиці теплоту й підвищені концентрації CO<sub>2</sub>. Однак такі підходи висувають підвищені вимоги до якості внутрішнього повітря (IAQ) та санітарно-гігієнічної безпеки, оскільки разом із повітрям до теплиці потенційно можуть надходити частинки, газоподібні домішки (зокрема леткі органічні сполуки – ЛОС), запахи та біоаерозолі [6, 15, 16]. У зв'язку з цим у літературі акцентується увага на необхідність визначення джерела повітря (з яких зон будівлі воно може відбиратися), запровадження режимних обмежень подавання та перетікання між різними зонами, а також використання фільтрування як інструмента зниження ризиків і підвищення керованості схеми [15, 16]. Таким чином, вимоги до якості повітря виступають не “додатковою” складовою, а частиною обмежень, у межах яких має формуватися стратегія керування мікрокліматом теплиці.

Окремий напрям досліджень зосереджений на оптимізаційних підходах до керування, зокрема на модельно-прогнозному керуванні (model predictive control – MPC), яке дозволяє формалізувати компроміс між енерговитратами та дотриманням цільових параметрів мікроклімату за наявності обмежень (наприклад, за температурою, відносною вологістю повітря, повітрообміном та якістю повітря) [19, 20]. У таких роботах підкреслюється, що ефективність оптимізаційних алгоритмів визначається не лише структурою моделі, а й якістю вихідних даних (давачі, прогнози погоди/сонячної радіації) та можливістю реалізувати керувальні дії в реальній системі (динаміка виконавчих механізмів, дискретність режимів, експлуатаційні обмеження) [13, 20]. Додатково, для коректного відтворення впливу вентиляції та повітророзподілення на мікроклімат у частині робіт використовують чисельне моделювання методами CFD (Computational Fluid Dynamics), що дозволяє уточнювати характеристику повітрообміну та зменшувати похибки енергетичних моделей у задачах валідування [8, 13].

Загалом огляд показує, що керування мікрокліматом інтегрованих теплиць є ефективним лише за умови одночасного врахування процесів взаємного обміну теплотою, вологою та CO<sub>2</sub>, а також вимог до якості повітря та можливості практичного впровадження режимів вентиляції. Тому в сучасних роботах усе частіше поєднують енергетичне моделювання з описом режимів керування та, за можливості, з експериментальним перевірянням, що підвищує достовірність висновків і придатність рекомендацій до практичного застосування [8, 13].

**Екологічне та комплексн оцінювання: LCA, логістика, сценарії енергоспоживання.** Поряд із теплотехнічними та мікрокліматичними аспектами, у сучасній літературі все частіше застосовуються підходи

екологічного та комплексного оцінювання інтегрованих теплиць у складі будівель. Основним інструментом у цій групі робіт є оцінка життєвого циклу (LCA), яка дозволяє зіставляти альтернативи за викидами CO<sub>2</sub>-екв. (CO<sub>2</sub>-equivalent) та іншими екологічними показниками з урахуванням матеріалів огорожувальних конструкцій, енергоносіїв, експлуатаційних режимів і меж системи [21, 22]. Публікації підкреслюють, що екологічний ефект істотно залежить від припущень щодо строку служби конструкцій, частоти заміни матеріалів та способів управління відходами, а також від того, чи залучено в межі аналізу енергоспоживання на підтримання мікроклімату та супутні інженерні системи [21, 22]. У результаті саме вибирання меж системи та вихідних даних часто визначає, наскільки коректно можна порівнювати результати різних досліджень.

Важливою складовою комплексного оцінювання є логістичний ефект локального виробництва, оскільки дахові й інтегровані теплиці потенційно скорочують транспортні шляхи, змінюють потребу в пакуванні та можуть зменшувати втрати продукції в ланцюгах постачання. Сценарні логістичні дослідження демонструють, що зменшення екологічного навантаження можливе не лише за рахунок зменшення енергоспоживання теплиці, але й через зміну структури постачання (зокрема, пакування, складування, відходів), причому величина ефекту є чутливою до місцевих умов збуту та організації ланцюга постачання [28]. Таким чином, екологічні переваги інтегрованого вирощування можуть формуватися як на рівні енерговитрат, так і на рівні логістичних процесів, але не є універсальними та потребують сценарного аналізу.

Окремі публікації розглядають інтегровані комплекси «будівля-теплиця» в ширших сценаріях енергоспоживання та керування енергією будівлі з погодинним балансом попиту й доступних енергоресурсів. У таких роботах теплиця аналізується як елемент, що може змінювати графік навантажень або споживати/перерозподіляти низькопотенціальні теплові потоки, а оцінювання передбачає узгодження режимів роботи теплиці та будівлі з огляду на сумарні витрати енергії та викидів [23]. Додатково розглядаються сценарії, у яких енергетичний та вуглецевий ефект істотно залежить від технологічних рішень у теплиці (наприклад, застосування штучного освітлення та тривалості фотоперіоду), що може змінювати баланс між очікуваними перевагами та додатковими витратами електроенергії [23]. У ширших ставленнях оптимізування енергоспоживання будівлі з інтегрованою теплицею може розглядатися як задача керування енергетичними потоками об'єкта, де теплиця виступає керованим споживачем з обмеженнями за параметрами мікроклімату [24].

Узагальнюючи, група робіт з LCA, логістики та сценарного аналізу енергоспоживання показує, що оцінювання інтегрованих теплиць має бути багатокритеріальним і враховувати не лише енергію на мікроклімат, але й матеріаломісткість огорожень, організування постачання продукції та призначення меж системи. Саме ці фактори визначають відтворюваність і порівнюваність результатів між дослідженнями та дозволяють коректно оцінювати умови, за яких інтегровані теплиці забезпечують екологічні переваги порівняно з альтернативними способами виробництва й постачання продукції [21–23, 28]. У табл. 1 наведено узагальнювальну систематизацію проаналізованих джерел із посиланнями на відповідні публікації.

Таблиця 1

**Узагальнення результатів огляду за тематичними групами**

Група/тема	Що охоплює	Типові рішення	Методи	Ключові КРІ	Типові обмеження	Джерела
<b>1. Типологія інтегрованих теплиць у сфері міського землеробства (BIA/RTG/iRTG/BiRTG)</b>	Термінологія, класифікація, практики впровадження	RTG/iRTG/BiRTG; ступінь інтеграції	Огляд, ситуаційний аналіз, BES	Тип залучення, площі/ потоки, ефекти	Конструктивні, нормативні, експлуатаційні бар'єри	[1–5, 10, 21, 25, 29, 30]
<b>2. Енергетична взаємодія «будівля-теплиця» та вплив на енергоспоживання будівлі</b>	Як інтеграція змінює потребу будівлі в опаленні/ охолодженні та пікові навантаження	Ефект теплового буфера на покрівлі, зміна піків, сценарії охолодження/ вентиляції	BES, ко-симулювання, сценарії, калібрування	Річна енергія, пікові навантаження, профілі навантажень на опалення/ охолодження	Сезонна/ сценарна залежність	[5, 7–9, 11–14, 23, 25, 26, 31]
<b>3. Вторинні джерела енергії в системі «будівля-теплиця»: теплопередача та теплота витяжного повітря</b>	Теплопередача через огороження, утилізація теплоти витяжного повітря	Теплопередача крізь перекриття/ вузли, витяжне повітря, активна вентиляція; теплоутилізація/ тепловий насос	BES/ко-симуляція, моніторинг, валідація	Енергія на опалення/ вентиляцію, температура, відносна вологість повітря, CO <sub>2</sub>	IAQ, фільтрація, режимні обмеження	[5–9, 13–17, 23, 31]
<b>4. Відновлювані</b>	Подвійна	Оптика	Баланси,	Теплові над-	Перегрів,	[4, 11,

Група/тема	Що охоплює	Типові рішення	Методи	Ключові КРІ	Типові обмеження	Джерела
<b>джерела енергії: світлове забезпечення та теплові надходження від сонячної радіації</b>	роль сонця: світло + теплота	огорожень, геометрія/орієнтація, екрани, компроміс «світло-перегрів»	BES, сценарії	ходження, ризик перегрівання, метрики освітлення/врожайності	сезонність, керування	12, 17, 18, 26, 27, 32]
<b>5. Керування мікрокліматом: режими вентиляції, фільтрування та вимоги до якості внутрішнього повітря (indoor air quality, IAQ)</b>	Керування температурою, відносною вологістю повітря, CO <sub>2</sub> з IAQ-обмеженнями	Режими вентиляції, фільтрування, сонцезахист/екрани, MPC/оптимізування	MPC, BES/ко-симуляція, CFD, моніторинг	Стабільність температури, відносною вологості повітря, дефіциту тиску пари (VPD); енергія, CO <sub>2</sub> , IAQ-показники	Практична можливість керування, вимоги до даних/датчиків	[3, 6, 13, 15, 16, 19, 20, 24]
<b>6. Екологічн та комплексн оцінювання: LCA, логістика, сценарії енергоспоживання</b>	LCA, CO <sub>2</sub> -екв, логістика, сценарії енергоспоживання/керування енергією	Межі системи, матеріали огорожень, постачання/пакування; енергетичні сценарії	LCA, сценарний аналіз, інколи зв'язок з енергетичними моделями	CO <sub>2</sub> -екв, енергомісткість, логістичні метрики	Залежність від меж/даних/сценаріїв	[21–24, 28–30]

**Висновки.** Узагальнення 32 публікацій показує, що ефект інтеграції теплиці з будівлею є сценарно та сезонно залежним і визначається балансом між потенційним зниженням потреби в опаленні (зокрема за рахунок теплової взаємодії кризь покрівлю та утилізуванню низькопотенційних ресурсів) і ризиком перегрівання з відповідним зростанням потреби у вентиляції/охолодженні в теплий період. Вторинні джерела енергії в системі «будівля-теплиця» охоплюють як теплопередачу кризь спільні огорожувальні конструкції та вузли, так і теплоту витяжного повітря. Їхнє практичне використання потребує узгодження з режимами керування мікрокліматом і врахування конструктивних і режимних обмежень (теплові мости, ризики конденсації, параметри

вентиляції). Використання витяжного повітря як носія теплоти й потенційного CO<sub>2</sub>-ресурсу є перспективним, однак має супроводжуватися дотриманням вимог до якості повітря (IAQ), санітарно-гігієнічних обмежень і вимог до фільтрування, а також контрольованими режимами подавання та перетікання повітря між зонами. Сонячна радіація в інтегрованих теплицях виконує подвійну функцію – формує як теплові надходження, так і світловий режим у зоні рослин. Тому ефективність доцільно оцінювати комплексно, з урахуванням оптики огорожень, геометрії й орієнтації, а також керованих засобів сонцезахисту та вентиляції для обмеження перегрівання. Найбільш інформативні та відтворювані результати в літературі отримують на основі погодинного енергетичного моделювання будівлі (BES) і ко-симуляції «будівля-теплиця», доповнених калібруванням/валідуванням за експериментальними даними; для задач повітророзподілення та локальних ефектів застосовується чисельне моделювання методами CFD, а для узгодження енерговитрат і мікрокліматичних критеріїв – оптимізаційні підходи, зокрема модельно-прогнозне керування (MPC). Окрім енергетичних показників, комплексне оцінювання інтегрованих теплиць має враховувати екологічні метрики (LCA, CO<sub>2</sub>-екв), логістичні ефекти локального виробництва та сценарії енергоспоживання будівлі. Результати таких оцінок є чутливими до меж системи, вихідних даних і припущень щодо матеріалів огорожень та режимів експлуатації.

**Перспективи подальших досліджень.** Подальші дослідження передбачають такі напрямки:

- Формалізувати критерії утилізування вторинних ресурсів, зокрема теплоти витяжного повітря та теплопередачі крізь огороження, із одночасним урахуванням енергетичного потенціалу, конструктивних та режимних обмежень, вимог до якості повітря (IAQ) та фільтрації.
- Узгодити світловий та тепловий режими в конфігураціях із високою часткою пасивної сонячної енергії шляхом поєднання оптичних рішень, сонцезахисту та керованих режимів вентиляції для зменшення ризику перегрівання.
- Розширити базу валідування моделей та підвищення можливості коректного порівняння результатів між різними кліматами й типами залучення споруд захищеного ґрунту шляхом уніфікування припущень, наборів вихідних даних і протоколів оцінювання.
- Розвива багатокритеріальне керування й оптимізування, зокрема модельно-прогнозне керування (MPC), із залученням реальних експлуатаційних обмежень (динаміка виконавчих механізмів, дискретність режимів, обмеження IAQ/фільтрації) та з урахуванням

інтегрованих показників енергії й екологічного ефекту.

### References

1. Astee, Lim Yinghui, Nirmal T. Kishnani. “Building Integrated Agriculture: Utilising Rooftops for Sustainable Food Crop Cultivation in Singapore.” *Journal of Green Building*, vol. 5, no. 2, 2010, pp. 105–13. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3992/jgb.5.2.105>.
2. Gould, D., T. Caplow. “Building-Integrated Agriculture: A New Approach to Food Production.” *Metropolitan Sustainability*, Elsevier, 2012, pp. 147–70. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1533/9780857096463.2.147>.
3. Appolloni, Elisa, Francesco Orsini, Kathrin Specht, Susanne Thomaier, Esther Sanyé-Mengual, Giuseppina Pennisi, Giorgio Gianquinto. “The Global Rise of Urban Rooftop Agriculture: A Review of Worldwide Cases.” *Journal of Cleaner Production*, vol. 296, May 2021, p. 126556. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126556>.
4. Drottberger, Annie, Yizhi Zhang, Jean Wan Hong Yong, Marie-Claude Dubois. “Urban Farming with Rooftop Greenhouses: A Systematic Literature Review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 188, Dec. 2023, p. 113884. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113884>.
5. Muñoz-Liesa, Joan, Mohammad Royapoor, Elisa López-Capel, Eva Cuerva, Santiago Gassó-Domingo, Alejandro Josa. “Rooftop Greenhouses: Energy And Environmental Synergies Of Bidirectional Integration With The Building.” [Rome, Italy], pp. 5097–104. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.211264>. Accessed 8 Mar. 2026.
6. Muñoz-Liesa, Joan, Mohammad Royapoor, Eva Cuerva, Santiago Gassó-Domingo, Xavier Gabarrell, Alejandro Josa. “Building-Integrated Greenhouses Raise Energy Co-Benefits through Active Ventilation Systems.” *Building and Environment*, vol. 208, Jan. 2022, p. 108585. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108585>.
7. Pons, Oriol, Ana Nadal, Esther Sanyé-Mengual, Pere Llorach-Massana, Eva Cuerva, David Sanjuan-Delmàs, Pere Muñoz, Jordi Oliver-Solà, Carla Planas, Maria Rosa Rovira. “Roofs of the Future: Rooftop Greenhouses to Improve Buildings Metabolism.” *Procedia Engineering*, vol. 123, 2015, pp. 441–48. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.084>.
8. Nadal, Ana, Pere Llorach-Massana, Eva Cuerva, Elisa López-Capel, Juan Ignacio Montero, Alejandro Josa, Joan Rieradevall, Mohammad Royapoor. “Building-Integrated Rooftop Greenhouses: An Energy and Environmental Assessment in the Mediterranean Context.” *Applied Energy*, vol. 187, Feb. 2017, pp. 338–51. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.051>.
9. Muñoz-Liesa, Joan, Mohammad Royapoor, Elisa López-Capel, Eva Cuerva,

Martí Rufi-Salís, Santiago Gassó-Domingo, Alejandro Josa. “Quantifying Energy Symbiosis of Building-Integrated Agriculture in a Mediterranean Rooftop Greenhouse.” *Renewable Energy*, vol. 156, Aug. 2020, pp. 696–709. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.098>.

10. Zambrano-Prado, Perla, Francesco Orsini, Joan Rieradevall, Alejandro Josa, Xavier Gabarrell. “Potential Key Factors, Policies, and Barriers for Rooftop Agriculture in EU Cities: Barcelona, Berlin, Bologna, and Paris.” *Frontiers in Sustainable Food Systems*, vol. 5, Sept. 2021, p. 733040. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.733040>.

11. Uk-Hyeon Yeo. *Dynamic Energy Analysis of Building-Integrated Rooftop Greenhouse for Urban Agriculture: Model Development and Applicability Assessment*. 2021, <https://dcollection.snu.ac.kr/common/orgView/000000166208>. Seoul National University, Dissertation.

12. Cho, Jeong-Hwa, Sang Min Lee, Sangseok Yu. “Dynamic Energy Analysis of Rooftop Greenhouse–Integrated Building According to Cooling Scenarios of Rooftop Greenhouses for Energy Saving.” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 75, Nov. 2025, p. 107115. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.107115>.

13. Yeo, Uk-Hyeon, Sang-Yeon Lee, Se-Jun Park, Jun-Gyu Kim, Jeong-Hwa Cho, Cristina Decano-Valentin, Rack-Woo Kim, In-Bok Lee. “Rooftop Greenhouse: (2) Analysis of Thermal Energy Loads of a Building-Integrated Rooftop Greenhouse (BiRTG) for Urban Agriculture.” *Agriculture*, vol. 12, no. 6, May 2022, p. 787. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/agriculture12060787>.

14. Jans-Singh, Melanie Kiren, Rebecca Ward, Ruchi Choudhary. “Co-Simulation of a Rooftop Greenhouse and a School Building in London, UK.” [Rome, Italy], pp. 3266–73. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.210355>. Accessed 8 Mar. 2026.

15. Tong, Zheming, Thomas H. Whitlow, Andrew Landers, Benjamin Flanner. “A Case Study of Air Quality above an Urban Roof Top Vegetable Farm.” *Environmental Pollution*, vol. 208, Jan. 2016, pp. 256–60. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.07.006>.

16. Buckley, Sarabeth, Rebecca Sparks, Elizabeth Cowdery, Finn Stirling, Jane Marsching, Nathan Phillips. “Enhancing Crop Growth in Rooftop Farms by Repurposing CO<sub>2</sub> from Human Respiration inside Buildings.” *Frontiers in Sustainable Food Systems*, vol. 6, Oct. 2022, p. 918027. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.918027>.

17. Montero, J. I., E. Baeza, E. Heuvelink, J. Rieradevall, P. Muñoz, M. Ercilla, C. Stanghellini. “Productivity of a Building-Integrated Roof Top Greenhouse in a Mediterranean Climate.” *Agricultural Systems*, vol. 158, Nov. 2017, pp. 14–22.

DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.agry.2017.08.002>.

18. Jing, Rui, Astley Hastings, Miao Guo. “Sustainable Design of Urban Rooftop Food-Energy-Land Nexus.” *iScience*, vol. 23, no. 11, Nov. 2020, p. 101743. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101743>.

19. Chen Wei-Han, You Fengqi. “Model Predictive Control on Integrated-Rooftop Greenhouse Climate Control.” *Chemical Engineering Transactions*, vol. 103, Oct. 2023, pp. 109–14. DOI.org (CSL JSON), <https://doi.org/10.3303/CET23103019>.

20. Yeo, Uk-Hyeon, Sang-Yeon Lee, Se-Jun Park, Jun-Gyu Kim, Young-Bae Choi, Rack-Woo Kim, Jong Hwa Shin, In-Bok Lee. “Rooftop Greenhouse: (1) Design and Validation of a BES Model for a Plastic-Covered Greenhouse Considering the Tomato Crop Model and Natural Ventilation Characteristics.” *Agriculture*, vol. 12, no. 7, June 2022, p. 903. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3390/agriculture12070903>.

21. Sanyé-Mengual, Esther, Ileana Cerón-Palma, Jordi Oliver-Solà, Juan Ignacio Montero, Joan Rieradevall. “Environmental Analysis of the Logistics of Agricultural Products from Roof Top Greenhouses in Mediterranean Urban Areas.” *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 93, no. 1, Jan. 2013, pp. 100–09. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1002/jsfa.5736>.

22. Sanjuan-Delmás, David, Pere Llorach-Massana, Ana Nadal, Mireia Ercilla-Montserrat, Pere Muñoz, Juan Ignacio Montero, Alejandro Josa, Xavier Gabarrell, Joan Rieradevall. “Environmental Assessment of an Integrated Rooftop Greenhouse for Food Production in Cities.” *Journal of Cleaner Production*, vol. 177, Mar. 2018, pp. 326–37. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.147>.

23. Ten Caat, Nick, Luuk Graamans, Martin Tenpierik, Andy Van Den Dobbelen. “Towards Fossil Free Cities—A Supermarket, Greenhouse & Dwelling Integrated Energy System as an Alternative to District Heating: Amsterdam Case Study.” *Energies*, vol. 14, no. 2, Jan. 2021, p. 347. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3390/en14020347>.

24. Choi, Se-Hyeok, Akhtar Hussain, Hak-Man Kim. “Optimal Operation of Building Microgrids with Rooftop Greenhouse Under Component Outages in Islanded Mode.” *Energies*, vol. 12, no. 10, May 2019, p. 1930. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3390/en12101930>.

25. Benis, Khadija, Christoph Reinhart, Paulo Ferrão. “Development of a Simulation-Based Decision Support Workflow for the Implementation of Building-Integrated Agriculture (BIA) in Urban Contexts.” *Journal of Cleaner Production*, vol. 147, Mar. 2017, pp. 589–602. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.130>.

26. Gholami, Mansoureh, Alberto Barbaresi, Patrizia Tassinari, Marco Bovo,

Daniele Torreggiani. “A Comparison of Energy and Thermal Performance of Rooftop Greenhouses and Green Roofs in Mediterranean Climate: A Hygrothermal Assessment in WUFI.” *Energies*, vol. 13, no. 8, Apr. 2020, p. 2030. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/en13082030>.

27. Lee, Jieun, Eunteak Lim, Nahyang Byun, Donghwa Shon. “Eco-Friendly Technology Derivation and Planning for Rooftop Greenhouse Smart Farm.” *Buildings*, vol. 14, no. 2, Feb. 2024, p. 398. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/buildings14020398>.

28. BENIS, Khadija, Ricardo GOMES, Ricardo VICENTE, Paulo FERRAO, John FERNANDEZ. *Rooftop Greenhouses: LCA and Energy Simulation*. Oct. 2015. *DOI.org (Datacite)*, <https://doi.org/10.5075/EPFL-CISBAT2015-95-100>.

29. Costanzo, V., G. Evola, L. Marletta. “Energy Savings in Buildings or UHI Mitigation? Comparison between Green Roofs and Cool Roofs.” *Energy and Buildings*, vol. 114, Feb. 2016, pp. 247–55. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.053>.

30. Sanyé-Mengual, Esther, Julia Martinez-Blanco, Matthias Finkbeiner, Marc Cerdà, Miria Camargo, Aldo R. Ometto, Luz Stella Velásquez, German Villada, Samuel Niza, André Pina, Gonçalo Ferreira, Jordi Oliver-Solà, Juan Ignacio Montero, Joan Rieradevall. “Urban Horticulture in Retail Parks: Environmental Assessment of the Potential Implementation of Rooftop Greenhouses in European and South American Cities.” *Journal of Cleaner Production*, vol. 172, Jan. 2018, pp. 3081–91. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.103>.

31. Choi, Eun-Jung, Doyun Lee, Sang-Min Lee. “Impact of Building Integrated Rooftop Greenhouse (BiRTG) on Heating and Cooling Energy Load: A Study Based on a Container with Rooftop Greenhouse.” *Agriculture*, vol. 14, no. 8, Aug. 2024, p. 1275. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3390/agriculture14081275>.

32. Ürge-Vorsatz, Diana, Luisa F. Cabeza, Susana Serrano, Camila Barreneche, Ksenia Petrichenko. “Heating and Cooling Energy Trends and Drivers in Buildings.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, Jan. 2015, pp. 85–98. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.039>.

UDC 697.7:631.234:620.92

PhD student **Serhii Morkovnyk**,

[s.morkovnyk@gmail.com](mailto:s.morkovnyk@gmail.com), ORCID: 0009-0003-9662-1951,

Dr Hab., Prof. **Viktor Mileikovskiy**,

[mileikovskiy.vo@knuba.edu.ua](mailto:mileikovskiy.vo@knuba.edu.ua), ORCID: 0000-0001-8543-1800,

*Kyiv National University of Construction and Architecture*

<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.57.135-155>

## **A REVIEW OF MODERN APPROACHES TO MICROCLIMATE CONTROL IN BUILDING-INTEGRATED GREENHOUSES USING SECONDARY AND RENEWABLE ENERGY SOURCES**

*This paper reviews recent approaches to microclimate control in rooftop and building-integrated greenhouses (RTG/iRTG/BiRTG) with a focus on utilising secondary energy resources from buildings and renewable solar energy. A structured synthesis of 32 publications is presented and organised into six thematic groups: (i) typology of integration in building-integrated agriculture, (ii) building-greenhouse energy interaction and impacts on building energy use, (iii) secondary resources in the “building-greenhouse” system, including heat transfer through shared envelopes and the thermal potential of ventilation exhaust air, (iv) solar radiation as a dual driver of heat gains and crop lighting, (v) microclimate control under indoor air quality (IAQ) and filtration constraints, and (vi) environmental and comprehensive assessment, including life-cycle assessment (LCA), logistics effects, and building energy-use scenarios. Across climates and operating modes, the literature indicates that the net benefit of integration is strongly seasonal and scenario-dependent: reduced heating demand in cold periods may be offset by overheating risk and increased cooling/ventilation demand in warm periods. Secondary resources can meaningfully contribute to greenhouse heating, but the use of exhaust air requires explicit IAQ constraints, filtration requirements, and operational limitations on air supply and interzonal air transfer. Solar energy must be assessed beyond thermal performance alone, because envelope optics, geometry, and orientation simultaneously determine crop lighting conditions and the magnitude of solar heat gains; therefore, ventilation and shading strategies are integral to preventing overheating while preserving adequate lighting. Methodologically, hourly building energy simulation (BES) and building–greenhouse co-simulation dominate, often complemented by CFD for airflow phenomena and optimization-based control, including model predictive control (MPC). The review highlights the need for calibration/validation against measurements to ensure comparability of results. Finally, commonly used performance indicators are summarised, covering energy,*

*microclimate stability, IAQ-related metrics, LCA-based indicators, logistics effects, and scenario-based energy-use outcomes.*

*Keywords: microclimate, rooftop greenhouse, building-integrated agriculture, secondary energy, solar radiation, IAQ, energy modeling, BES, LCA.*

Received/Надійшла до редакції 02.03.2026

Accepted/Прийнято 16.04.2026

Issued/Опубліковано 29.05.2026

 Distributed under the license / Розповсюджується за ліцензією:

*Creative Commons Attribution 4.0 International License*