

УДК 697.1

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ РАДІАЦІЙНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ

Демченко В.Г.¹, канд. техн. наук, Погорєлова Н.Д.²

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна

¹завідувач лабораторії DemchenkoVG@nas.gov.ua, <https://orcid.org/0000-0002-4211-356X>²головний конструктор n_pogorelova@i.ua, <https://orcid.org/0009-0007-7038-6403><https://doi.org/10.31472/tpe.4.2025.5>

Технологія пасивного радіаційного охолодження завдяки своїй енергоощадній та екологічній природі має великі перспективи застосування. Зазвичай системи радіаційного охолодження (RCS) поділяють на дві категорії: денне та нічне радіаційне охолодження. Обидва типи забезпечують ефективне вивільнення тепла в навколишнє середовище шляхом випромінювання в середньому інфрачервоному діапазоні. Конструкції RCS використовують кольорові метали, діелектрики, метаструктури, багатошарові конструкції, а також біонічні структури. RCS застосовуються в терморегулюючому текстилі та в енергозберігаючих пристроях, що використовуються в різних сферах - таких як терморегуляція будівлі, атмосферний збір води, електроніка, фотоелектричні системи тощо. У статті розглядаються фундаментальні принципи технології RCS, висвітлюються останні результати досліджень, методів проектування матеріалів та конструкцій, а також проблеми, з якими стикається впровадження систем радіаційного охолодження.

Passive radiative cooling technology is energy-efficient and eco-friendly, making it promising for many applications. Radiative cooling systems (RCS) are generally split into two types: daytime and nighttime radiative cooling. Both types work by releasing heat into the environment through radiation in the mid-infrared range. The design of RCS includes materials like non-ferrous metals, dielectrics, metastructures, multilayer structures, and bionic designs. The systems are used in thermoregulations clothing and energy-saving devices across different areas such as building temperature control, atmospheric water collection, electronics, and photovoltaic systems. The article explains the basic ideas behind RCS technology, discusses recent research, covers methods for designing materials and structures, and also points out the challenges that come with implementing radiative cooling systems.

Ключові слова: система, радіаційне охолодження, матеріали, енергозбереження, екологія.

Keywords: system, radiative cooling, materials, energy saving, ecology.

Вступ. Для зменшення споживання енергії терміново потрібні інноваційні технології охолодження з меншим споживанням енергії та низькими викидами вуглецю. Оскільки глобальне потепління стає дедалі загрозливішим, а енергетична криза посилюється, традиційні холодильні технології виділяють великий обсяг теплоти та парникових газів під час роботи, що ще більше загострює екологічні проблеми.

Технологія пасивного радіаційного охолодження – перспективна технологія, яка дає змогу ефективно заощаджувати енергію, працюючи без використання зовнішніх джерел електроенергії. Вона ґрунтується на другому законі термодинаміки, який пояснює, що тепло завжди переміщується від об'єкта з вищою температурою до об'єкта з нижчою температурою, і цей процес є незворотним. Ця технологія заснована на природних процесах навколишнього середовища. Одним із таких явищ є утворення роси на поверхнях у нічний час. Використовуючи цей природний ефект, були розроблені радіаційні охолоджуючі поверхні, здатні досягати тем-

ператури нижче кімнатної вночі [1]. Існує значна різниця температур між поверхнею Землі (приблизно 300 К) та холодним Всесвітом (приблизно 3 К). Ця різниця змушує об'єкти на Землі виділяти тепло в космічний простір, тим самим досягаючи ефекту охолодження [2]. Отже, об'єкт має змогу самостійно віддавати тепло у вигляді теплового випромінювання в космос, що сприяє зниженню його температури та, як наслідок, ефекту радіаційного охолодження.

Атмосфера Землі загалом підтримує баланс у розподілі енергії. Велика частина сонячного випромінювання, яке має короткі хвилі (0,3...2,5 мкм), потрапляючи в атмосферу, поглинається різними об'єктами на поверхні Землі, а частина відбивається назад у космос. Одночасно об'єкти на поверхні випромінюють тепло у вигляді довгохвильового випромінювання, особливо в діапазоні від 2,5 мкм до 50 мкм. У цьому діапазоні більша частина випромінювання поглинається, але деяка його частина може випромінюватися безпосередньо у космос через атмосферне вікно прозорості, яке

знаходиться в області 8...13 мкм (Рис. 1). Провали на графіку вказують на ділянки, де трьохатомні гази атмосфери поглинають випромінювання. Охолодження можливе, коли об'єкт поглинає менше сонячного тепла, ніж випромінює.

Озон (O_3) має високу інфрачервону смугу поглинання в діапазоні 9-10 мкм, CO_2 має високе поглинання в діапазоні від 12,5 до 17,5 мкм, а водяна пара демонструє високе поглинання при перетині понад 16 мкм. З цих трьох основних компонентів разом з іншими газами є три атмосферні вікна в межах 2,5–5, 8–13 і 16–22 мкм [3]. Найбільш помітне атмосферне вікно розташоване в середньому інфрачервоному (MIR) діапазоні, приблизно між 8 і 13 мкм. У цьому діапазоні атмосферні гази, такі як водяна пара та вуглекислий газ, поглинають мінімальну кількість тепла, що забезпечує ефективне випромінювання теплоти від поверхні Землі у космос. За збігом обставин ці прозорі вікна співпадають з піком випромінювання абсолютно чорного тіла при температурі, відповідній поверхні Землі. Це має важливе значення для здатності нашої планети відводити надлишкове тепло і таким чином охолоджуватись. Інші атмосферні вікна також допомагають випромінювати тепло, але їхній потік тепла значно менший (приблизно 10% від основного вікна), а у вікні 16–22 мкм радіаційний теплообмін практично не відбувається через поглинання інфрачервоного випромінювання водяною парою.

Принципи радіаційного охолодження поверхні. Для об'єкта, який знаходиться на земній поверхні і взаємодіє з атмосферою, загальний радіаційний ефект є результатом поєднання поглинання сонячного тепла (впродовж

добі) і випромінювання тепла Землі. Чиста потужність радіаційного охолодження може бути виражена так:

$$P_{ox} = P_{sun} - P_{rad} - P_{atm} - P_{cond+conv} \quad (1)$$

де: P_{ox} – чиста потужність охолодження; P_{rad} – потужність теплового випромінювання, що випускається поверхнею радіаційного охолоджувача; P_{atm} – потужність, поглинена тепловим випромінюванням атмосфери; P_{sun} – потужність, поглинена сонячним випромінюванням; $P_{cond+conv}$ – це сума потужностей теплопровідності та конвекції між радіаційним охолоджувачем і навколишнім середовищем.

Таким чином, щоб досягти сумарного радіаційного охолодження, потужність P_{rad} має бути максимальною, а P_{sun} , P_{atm} і $P_{cond+conv}$ – мати мінімальні значення, кожна з яких розраховується окремо.

Потужність теплового випромінювання (P_{rad}) залежить від випромінювальної здатності та температури матеріалу і являє собою теплове випромінювання, що випромінюється поверхнею об'єкта. Його можна розрахувати за допомогою наступного рівняння:

$$P_{rad} = \int \cos \theta \, d\Omega \int_0^\infty \varepsilon(\theta, \lambda) I_{BB}(\lambda, T_c) d\lambda \quad (2)$$

де θ являє собою кут між падаючим напрямком сонячного випромінювання і вертикальним напрямком поверхні, λ позначає довжину хвилі, $\varepsilon(\theta, \lambda)$ - випромінювальна здатність матеріалу, T_c вказує на температуру матеріалу, а $I_{BB}(\lambda, T_c)$ – інтенсивність спектрального випромінювання чорного тіла при температурі T_c , яку можна визначити як:

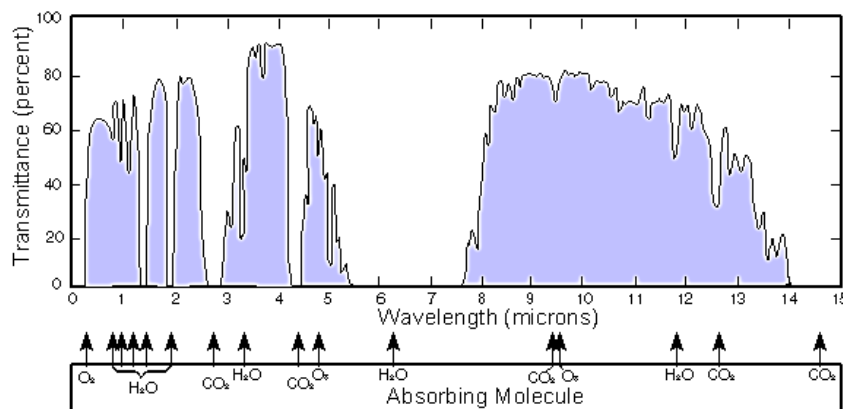


Рисунок 1. Прозорість земної атмосфери та інтенсивність ліній поглинання H_2O , O_3 і CO_2 при температурі 296 K в інфрачервоному діапазоні

Figure 1. Transparency of the Earth's atmosphere and intensity of H_2O , O_3 and CO_2 absorption lines at a temperature of 296 K in their infrared range

$$I_{BB}(\lambda, Tc) = \frac{2hc^2}{\lambda^5(e^{hc/\lambda kT} - 1)}, \quad (3)$$

де h – постійна Планка ($6,626 \times 10^{-34} \text{ J s}^{-1}$), k – постійна Больцмана ($1,381 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$), c — швидкість, з якою світло поширюється у вакуумі ($2,998 \times 10^8 \text{ Дж с}^{-1}$) [4].

Чотирма основними принципами, пов'язаними з тепловим випромінюванням, є закон Кірхгофа, закон радіації Планка, закон Стефана-Больцмана і закон зміщення Віна. Добре відомо, що коли теплове випромінювання вступає в контакт з матеріалом, воно зазвичай поглинається, передається або відбивається, або є комбінацією цих процесів. При цьому загальна передача енергії дорівнює сумі цих трьох компонентів. Закон Стефана-Больцмана можна визначити так:

$$P = \varepsilon \sigma T^4 \quad (4)$$

$$\alpha(\lambda) + \tau(\lambda) + R(\lambda) = 1 \quad (5)$$

У цій формулі P представляє щільність потужності теплового випромінювання, σ – постійна Стефана-Больцмана, T позначає температуру поверхні матеріалу, а ε – поверхневу випромінювальну здатність матеріалу. Якщо, α , R і τ стосуються поглинальної здатності, відбивної здатності та коефіцієнта пропускання матеріалу, відповідно, то λ позначає довжину хвилі. Випромінювальну здатність матеріалу $\varepsilon(\theta, \lambda)$ можна отримати безпосередньо із закону Кірхгофа $\alpha(\lambda) = \varepsilon(\lambda)$.

Для динамічного радіаційного терморегулювання ефективний RCS вимагає максимізації зовнішнього теплового випромінювання матеріалу, що означає довгохвильову інфрачервону випромінювальну здатність і ε має бути якомога ближче до 1,0. Приходимо до висновку, що для того, щоб ефективно охолодити об'єкт за допомогою випромінювання, потрібно повністю використовувати умови, які сприяють теплообміну між охолоджувачем і навколишнім середовищем. Коли температура об'єкта близька до 300 К, його випромінювання відповідає діапазону 8–13 мкм, який є прозорим для атмосфери, що сприяє реалізації радіаційного охолодження. З цього випливає, що охолоджувач має максимально випромінювати теплову енергію в цьому діапазоні, щоб передати якомога більше тепла в космічний простір. У інших частках спектру, де атмосфера непрозора, випромінювання охолоджувача втрачається мало. Коли температура охолоджувача нижча за температуру навкруг, він поглинає енергію, яка йде з навколишнього середовища. Щоб уникнути цього, охолоджувач має мати низьку здатність поглинати енергію в тих діапазонах, де

це потрібно. У випадках, коли температура вища, ніж навколишня, а потрібно максимально охолодити, охолоджувач може втрачати теплову енергію навіть за межами діапазону атмосферного вікна. У таких ситуаціях краще використовувати охолоджувач, який випромінює в усіх діапазонах теплового випромінювання [5].

Основна ідея ефективного охолодження полягає в точному керуванні оптичними властивостями матеріалу в широкому спектрі теплового випромінювання від ультрафіолетового до інфрачервоного діапазону. Це дозволяє оптимізувати втрати радіаційної енергії в космос і зменшити поглинання сонячного тепла. Оскільки процес є пасивним і відновлюваним, він досяг значних результатів в енергоефективних будинках, тепловій системі управління та інших галузях. Проте підтримка ефекту охолодження вдень була серйозною проблемою. Зміни відбулися в 2014 році, коли вперше вдалось поєднати високий коефіцієнт відбиття сонячного світла з високим коефіцієнтом випромінювання теплоти в атмосферному вікні завдяки фотонному випромінювачу. В останні роки технологія RCS зазнала суттєвого прогресу в кількох важливих галузях, зокрема у підвищенні охолоджувальної здатності. Проте, незважаючи на глибше усвідомлення механізму охолодження, RCS все ще стикається з проблемами щодо довговічності та потенційної функціональності матеріалів.

У процесі розвитку технологій радіаційного охолодження досягнуто важливих результатів, задля того щоб збільшити їх здатність розрізняти відмінні частоти поглинання світла в інфрачервоному діапазоні, що значно підвищує їх ефективність [6]. Однак, якщо застосовувати цей підхід лише для охолодження, можна отримати надмірно низькі температури, що може знизити комфорт людини або погіршити працездатність об'єкта у холодну пору року. Тому дослідники почали розглядати матеріали, які можна використовувати для одночасного нагріву та охолодження об'єкта [7]. Ці новітні матеріали мають високий коефіцієнт відбиття сонячного світла та теплової хвилі, коли потрібно охолодження, що забезпечує добре відбирання тепла. Навпаки, коли потрібно нагрівання, той самий коефіцієнт знижується, що зменшує ефект охолодження і збільшує вплив сонячного тепла. Така поверхня поглинає сонячне тепло, зберігає його і зменшує втрату теплоти через випромінювання. Ця здатність динамічно керувати теплом є суттєвим покращенням в управлінні радіаційною тепловіддачею для різних об'єктів незалежно від погодних умов.

Протягом останнього десятиліття було розроблено різноманітні високоефективні матеріали

для радіаційного охолодження. Для оптимальної продуктивності охолодження матеріали RCS повинні мати надзвичайно низьку поглинальну здатність у сонячному спектрі, водночас маючи високу випромінювальну здатність для ефективного розсіювання надлишкового тепла в холодний космічний простір. Головні напрями пошуку нових матеріалів для RCS представлені на рисунку 2.

Слід зазначити, що більшість з них на цей час перебувають на рівні наукових розробок та проведення лабораторних досліджень. Тому обмежимося розглядом основних комерційних впроваджень.

Неорганічні діелектричні матеріали. Діелектричні матеріали з широкими забороненими смугами (розташована між валентною зоною і зоною провідності) мають надзвичайно низьку поглинальну здатність у сонячному спектрі. Сонячне випромінювання включає ультрафіолетове, видиме та ближнє інфрачервоне світло (0,3–2,5 мкм) з енергіями фотонів у діапазоні від 0,49 до 4,13 еВ [8]. Найбільш розповсюджені матеріали: сульфат барію, оксид алюмінію, оксид кремнію, оксид магнію та нітрид кремнію. Окрім того, у видимому діапазоні більшість неорганічних діелектричних матеріалів забезпечують ефективне розсіювання сонячного світла на межах розділу з повітрям або полімерами.

Металеві матеріали. Металеві матеріали, такі, наприклад, як поліроване срібло та алюміній, використовують як теплові відбивачі. Високу відбивну здатність металів можна пояснити великою кількістю в них вільних електронів. Коли сонячне світло освітлює поверхню металу, електромагнітні хвилі викликають коливання та прискорення у вільних електронах. Отже,

рух цих електронів генерує струм, що призводить до виникнення електромагнітної хвилі, яка має ідентичну частоту, але протилежний напрямок до падаючої електромагнітної хвилі від джерела випромінювання.

Полімери. Полімери з низькими коефіцієнтами ослаблення електромагнітних хвиль у середовищі є дуже бажаними для використання в RCS. Матеріали з низькими коефіцієнтами поглинання у сонячному спектрі послаблюють інтенсивність випромінювання [9]. Окрім того, коефіцієнт поглинання в ближньому інфрачервоному діапазоні тісно пов'язаний з коливальними переходами хімічних зв'язків матеріалу [10].

Багатошарові структури. Багатошарові структури поєднують застосування оптичних властивостей різних матеріалів, а саме: показник заломлення; поглинальну здатність та випромінювальну здатність. Така структура забезпечує регулювання відбиття та випромінювання шляхом поєднання декількох шарів для досягнення ефективного охолодження та подолання обмеження традиційних одношарових покриттів. Багатошарова структура, окрім радіаційного охолодження, також може забезпечувати створення мультиспектральних тканин і матеріалів [11].

Аналіз різних стратегій підвищення ефективності пасивних радіаційних охолоджувачів показує, що зменшення відбиття сонячного світла в ультрафіолетовому і інфрачервоному діапазоні та оптимізація ІЧ-випромінювання можуть суттєво збільшити ефект охолодження. Крім того, поєднання радіаційного охолодження з іншими методами, такими як охолодження випаровуванням і матеріалами зі зміною фази, пропонує перспективні шляхи для підвищення ефективності охо-



Рисунок 2. Матеріали для систем радіаційного охолодження

Figure 2. Materials for radiative cooling systems

лодження та досягнення енергозберігаючих рішень. Приклади застосування радіаційного охолодження приведені на рисунку 3.

Енергоефективні будинки. Будинки вносять суттєвий вплив на світове споживання енергії, споживаючи до 30% від річного використання енергії, а також викидають 10% глобальних парникових газів. Це створює значні екологічні та економічні проблеми в нашому прагненні до стійкого майбутнього. Майже половина цього енергоспоживання припадає на опалення та охолодження приміщень, що вказує на важливість інноваційних рішень для управління температурою будівель. Отже, перспективне рішення для будівель з нульовим енергоспоживанням потребує можливості динамічного регулювання радіаційних властивостей огорожувальних елементів, що може підвищити енергоефективність будинків і забезпечити їх стійку експлуатацію. Для досягнення цієї мети необхідно скористатися двома безмежними джерелами: Сонцем (5800 К), яке слугує джерелом теплоти, та космічним простором (3 К), що діє як джерело холоду. Ці джерела мають потенціал задовольнити потреби будівель в опаленні та охолодженні без залучення вичерпаного палива.

Радіаційним охолоджуючим фарбам притаманні висока відбивна та висока випромінювальна здатності у середньому інфрачервоному діапазоні, які можуть бути отримані в межах одного шару [1]. Фарби на основі полімерів мають високу інфрачервону випромінювальну здатність, тоді як їх висока сонячна відбивна здатність може бути досягнута за допомогою застосування пористих структур. Це пояснюється тим, що для відбиття сонячного світла в спектрі 0,3–2,5 мкм бажано використовувати широкий діапазон розмірів пор. Коли по-

ристий шар і інфрачервоний випромінювальний шар розділяються, верхній пористий шар виконує функцію сонячного відбивача, інфрачервоного передавача і теплоізолятора одночасно [12].

Для оптимального пасивного денного радіаційного охолодження матеріали повинні мати високий коефіцієнт відбиття в діапазоні довжин хвиль сонячного випромінювання від 0,3 до 2,5 мкм, демонструючи при цьому високий коефіцієнт теплового випромінювання, близький до одиниці, у першому та другому прозорих вікнах (8–13 мкм та 16–21 мкм) для охолодження вище температури довкілля. І навпаки, ідеальний селективний сонячний поглинач повинен мати високу сонячну абсорбційну здатність для ефективного збору сонячної енергії для нагрівання і відносно низьку теплову емісію, щоб мінімізувати радіаційне виділення тепла через поверхневе теплове випромінювання. Потрібна поверхня з динамічною можливістю налаштування між нагріванням та охолодженням, яка здатна регулюватися за зовнішньою температурою або за допомогою механічних/електричних стимулів, забезпечуючи перемикання режимів, придатних для різних кліматичних зон [13].

Текстильні вироби та матеріали. Сучасна текстильна промисловість стикається з невпинним попитом споживачів на інноваційне застосування нових технологій. Останніми роками з'явилися так звані «розумні текстилі», які є похідними від поєднання більш традиційних матеріалів з розумними наноматеріалами. Розумний текстиль - це той, який може відчувати зміни в навколишньому середовищі і реагувати зміною одного або декількох своїх параметрів для виконання певної функції [14]. У розвитку розумного текстилю існувало



Рисунок 3. Запровадження радіаційного охолодження в реальних сферах застосування

Figure 3. Implementation of radiative cooling in real-world applications

три генерації. Розумний текстиль першого покоління - або «пасивний» - це той, який відчуває зміни в навколишньому середовищі, але не може регулювати свої властивості у відповідь. Наприклад, тканини, покриті різними наночастинками оксиду металу, дають можливість виробляти одяг, стійкий до ГЧ/ультрафіолету, а бавовна, просочена наночастинками срібла, має антимікробні властивості. Розумний текстиль другого покоління – або «активний» – включає тканини, які спочатку сприймають зміни або подразники з навколишнього середовища, а потім відповідним чином реагують. Прикладами можуть служити термохромні текстилі, які реагують на зміну температури зміною кольору і форми текстилю, який може реагувати на механічні деформації. Активний текстиль третього покоління, який також називають «суперрозумним», інтегрований з м'якою та розумною електронікою, що включає датчики, оптичні гаджети, наногенератори та пристрої накопичення енергії. Наприклад, вбудована в одяг електроніка може забезпечувати чутливість до різних забруднювачів, хвороб або інших загроз. Також привабливі оптичні прилади на розумному текстилі можуть підтримуватися наногенераторами і накопичувачами енергії.

Включення нанотехнологій до RCS дозволяє виробляти розумні та багатофункціональні текстильні вироби з безліччю інноваційних застосувань у сферах охорони здоров'я, фармацевтики, моди, спорту, військової справи, передового захисту та транспорту. Виробництво мікроелектронних пристроїв в даний час знаходиться на рівні, коли вони можуть бути об'єднані в текстиль і дозволяють використовувати унікальні можливості наноматеріалів для додавання високої доданої вартості до тканин і одягу, зберігаючи при цьому інші бажані властивості, такі як комфорт, гнучкість, легкість і естетичний вигляд. Багато текстильних матеріалів, таких як бавовна, шовк або поліестер, є ідеальними матеріалами для інтеграції функціональних наноматеріалів [15]. Були розроблені різні підходи до включення наноматеріалів у текстиль. Один з них використовується під час виробництва волокон, з яких виготовляються текстильні вироби. Інший застосовується на етапах фінішної обробки, наприклад, за допомогою технологій друку, нанесення розпилення або просочення. Окрім того, відносно новий метод електропрядіння для отримання волокон і тканин з обробленої сировини і показав себе як ідеальний варіант для виготовлення нововолокон.

У технологіях покриття різні органічні та неорганічні сполуки можуть вироблятися у вигляді частинок у нанорозмірному діапазоні та безпосередньо використовуватися. Приклади використання включа-

ють поліацетилен, поліпірол, поліанілін, різні метали, вуглецеві нанотрубки (ВНТ), MXenes. Текстиль, модифікований цими наноматеріалами, має потенційне застосування в загоєнні ран, очищенні повітря, доставці ліків, косметичці, виробництві відновлюваної енергії та електронних приладах, таких як виготовлення діодів, транзисторів, електронних схем та інше.

Висновки.

1. Технологія RCS має дуже великий потенціал і за останні десять років постійно покращується. Радіаційне охолодження застосовується у різних сферах, включаючи енергоефективні будинки, охолодження електронних пристроїв, одержання води з повітря, текстильну промисловість та сільське господарство.

2. Традиційні методи охолодження мають низьку ефективність, використовують велику кількість електроенергії та призводять до забруднення природного середовища. Тому необхідно розробляти ефективні, енергозберігаючі і екологічно чисті технології охолодження.

3. Вибір матеріалів та конструкцій для RCS має значення для отримання ефективного радіаційного охолодження. Вони визначають вимоги до матеріалів, щоб досягти високих коефіцієнтів відбивання сонячного світла та високих коефіцієнтів випромінювання.

4. Останнім часом активно досліджуються різні матеріали і конструкції, такі як фотонні, ієрархічні та пористі структури. Але їх практичне застосування все ще має серйозні труднощі. Наразі вони виготовляються лише в лабораторних умовах, а їх масштабування обмежене через недоліки в недовговічності і високою вартістю.

5. Ефективність охолодження в зовнішніх умовах може залежати від різних факторів середовища. Тому важливо звернути увагу на довговічність і стабільність матеріалів, таких як самоочищення, водонепроникність, механічні властивості та стійкість до ультрафіолетового впливу.

6. Неорганічні та полімерні матеріали доступніші, дешевші та простіші в виробництві. Комбінування цих матеріалів з пористими, багат шаровими структурами, фотонними кристалами та/або біоміметичними конструкціями відкриває нові можливості для подальшого розвитку систем і технологій радіаційного охолодження.

7. Впровадження RCS в великомасштабне виробництво залежить від структурного проектування, технології виготовлення матеріалів, їх економічної ефективності та впливу на навколишнє середовище.

ЛІТЕРАТУРА:

1. O.S. Titlov, O.P. Tsoi, T.A. Ashiket *et al.*, Development of cooling systems using renewable thermal energy sources and night-time radiation technology, September 2024, Refrigeration Engineering and Technology, 60(3):178-196, <https://doi.org/10.15673/ret.v60i3.3048>
2. Dongliang Zhao, Ablimit Aili, Yao Zhai, Shaoyu Xu, Gang Tan, Xiaobo Yin, Ronggui Yang, Radiative sky cooling: Fundamental principles, materials, and applications, *Appl. Phys. Rev.* 6, 021306, 2019, <https://doi.org/10.1063/1.5087281>
3. Chongjia Lin, Keqiao Li, Meng Li, Benjamin Doppoopho, Jiongzhi Zheng, Jiazheng Wang, Shanshan Du, Yang Li, Baoling Huang, Pushing Radiative Cooling Technology to Real Applications, *Physical Sciences Journals, Advanced Materials*, October 2024, <https://doi.org/10.1002/adma.202409738>
4. W. Zha, Y. Zhu, B. Ma, J. Yu, P. Ghosh *et al.*, Nonvolatile high-contrast whole long-wave infrared emissivity switching based on In₃SbTe₂. *ACS Photonics* 10(7), 2165–2172 (2022). <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.2c00714>
5. Wan-Wan Huang, Hao-Kai Peng, Xianjin Hu, Jinlong Zhou, Xiaomeng Wang, Ting-Ting Li, Jia-Horng Lin, Recent Research Progress in Passive Daytime Radiative Cooling Technology in Terms of Material Structure and Practical Application, *Journal of Applied Polymer Science*, October 2025, <https://doi.org/10.1002/app.58094>
6. Wang, Jiayun, *et al.* Materials, structures, and devices for dynamic radiative cooling. December 2022, *Cell Reports Physical Science* 3(12):101198, <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2022.101198>
7. Xie Long, Wang Xuechuan, Bai Yageng, Zou Xiaoliang, Liu Xinhua, Fast-Developing Dynamic Radiative Thermal Management: Full-Scale Fundamentals, Switching Methods, Applications, and Challenges, *Nano-Micro Letters*, Volume 17, Issue 1, id.146, 2025, <https://doi.org/10.1007/s40820-025-01676-68>
8. Tong, Z., Peoples, J., Li, X., Yang, X., Bao, H., & Ruan, X., Electronic and phononic origins of BaSO₄ as an ultra-efficient radiative cooling paint pigment. *Materials Today Physics*, 24, 2022, 100658, <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2022.100658>
9. R.L. Politansky I.T. Kohut M.V. Vistak I. Diskovsky, Modeling of a multilayer high-tech film for an infrared profile photodetector (3.5-5.0 μm), *Physics and Chemistry of Solids*, 2024, 25(4):757-763, <https://doi.org/10.15330/шт.25.4.757-763>
10. Demchenko V.G., Development of multifunctional camouflage material, Central Research Institute of Armaments and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine, Current problems of military-technical policy and directions of arming the Armed Forces of Ukraine under martial law, Abstracts of reports at the X International Scientific and Technical Conference, 2024, Kyiv, p. 231
11. Wang, T., Wu, Y., Shi, L. *et al.* A structural polymer for highly efficient all-day passive radiative cooling. *Nat Commun* 12, 365, 2021, <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20646-7>
12. Bin Zhao, Mingke Hu, Xianze Ao, Nuo Chen, Gang Pei, Radiative cooling: A review of fundamentals, materials, applications, and prospects, *Applied Energy*, Volume 236, February 2019, Pages 489-513, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.018>
13. Ablimit Aili, Tengyao Jiang, Jingjing Chen, Yonggang Wen, Ronggui Yang, Xiaobo Yin, Gang Tan, Passive daytime radiative cooling: Moving beyond materials towards real-world applications, *Next Energy* Volume 3, April 2024, 100121, <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2024.100121>
14. Mudasir Akbar Shah, Bilal Masood Pirzada, Gareth Price, Abel L. Shibiru, Ahsanulhaq Qurashi, Applications of nanotechnology in smart textile industry: A critical review, *Journal of Advanced Research*, Volume 38, May 2022, Pages 55-75, <https://doi.org/10.1016/j.jare.2022.01.008>
15. Yetisen, Ali K., *et al.* "Nanotechnology in textiles." *ACS nano* 10.3, 2016: 3042-3068, <https://doi.org/10.1021/acsnano.5b08176>

PROSPECTS OF APPLICATION OF RADIATION COOLING SYSTEMS

Demchenko Volodymyr Georgievich¹,
Pogorelova Natalia Dmitrivna²

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Marii Kapnist St., Kyiv, 03057, Ukraine

¹Head of Laboratory, PhD (Engin.), DemchenkoVG@nas.gov.ua, <https://orcid.org/0000-0002-4211-356X>

²Chief Designer, n_pogorelova@i.ua, <https://orcid.org/0009-0007-7038-6403>

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2025.5>

This article reviews the fundamental principles of radiative cooling technology, highlights the latest research results, design methods for materials and structures, and challenges faced in their implementation. Innovative cooling technologies with lower energy consumption and low carbon emissions are urgently needed to reduce energy consumption. The purpose of this article is to familiarize the scientific community, designers and planners with the latest developments and possibilities of using radiative cooling systems (RCS) in the fields of energy-efficient construction, 3rd generation smart fabric materials, electronic device cooling systems, obtaining drinking water from the atmosphere and agriculture. RCS designs use non-ferrous metals, dielectrics, metastructures, multilayer structures, as well as bionic structures. But their practical application still has serious difficulties. Currently, they are only manufactured in laboratory conditions, and their scalability is limited due to the disadvantages of short durability and high cost. The cooling efficiency in outdoor conditions may depend on various environmental factors. Therefore, it is important to pay attention to the durability and stability of materials, such as self-cleaning, water resistance, mechanical properties and UV resistance. The implementation of RCS in large-scale production depends on the structural design, material manufacturing technology, their cost-effectiveness and environmental impact.

References 30, figures 3.

Key words: system, radiative cooling, materials, energy saving, ecology.

1. O.S. Titlov, O.P. Tsoi, T.A. Ashiket al., Development of cooling systems using renewable thermal energy sources and night-time radiation technology, September 2024, Refrigeration Engineering and Technology, 60(3):178-196, <https://doi.org/10.15673/ret.v60i3.3048>

2. Dongliang Zhao, Ablimit Aili, Yao Zhai, Shaoyu Xu, Gang Tan, Xiaobo Yin, Ronggui Yang, Radiative sky cooling: Fundamental principles, materials, and applications, Appl. Phys. Rev. 6, 021306, 2019, <https://doi.org/10.1063/1.5087281>

3. Chongjia Lin, Keqiao Li, Meng Li, Benjamin Doppooha, Jiongzhi Zheng, Jiazheng Wang, Shanshan Du, Yang Li, Baoling Huang, Pushing Radiative Cooling Technology to Real Applications, Physical Sciences Journals, Advanced Materials, October 2024, <https://doi.org/10.1002/adma.202409738>

4. W. Zha, Y. Zhu, B. Ma, J. Yu, P. Ghosh et al., Nonvolatile high-contrast whole long-wave infrared emissivity switching based on In₃SbTe₂. ACS Photonics 10(7), 2165–2172 (2022). <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.2c00714>

5. Wan-Wan Huang, Hao-Kai Peng, Xianjin Hu, Jinlong Zhou, Xiaomeng Wang, Ting-Ting Li, Jia-Horng Lin, Recent Research Progress in Passive Daytime Radiative Cooling Technology in Terms of Material Structure and Practical Application, Journal of Applied Polymer Science, October 2025, <https://doi.org/10.1002/app.58094>

6. Wang, Jiayun, et al. Materials, structures, and devices for dynamic radiative cooling. December 2022, Cell Reports Physical Science 3(12):101198, <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2022.101198>

7. Xie Long, Wang Xuechuan, Bai Yageng, Zou Xiaoliang, Liu Xinhua, Fast-Developing Dynamic Radiative Thermal Management: Full-Scale Fundamentals, Switching Methods, Applications, and Challenges, Nano-Micro Letters, Volume 17, Issue 1, id.146, 2025, <https://doi.org/10.1007/s40820-025-01676-68>

8. Tong, Z., Peoples, J., Li, X., Yang, X., Bao, H., & Ruan, X., Electronic and phononic origins of BaSO₄ as an ultra-efficient radiative cooling paint pigment. Materials Today Physics, 24, 2022, 100658, <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2022.100658>

9. R.L. Politansky I.T. Kohut M.V. Vistak I. Diskovsky, Modeling of a multilayer high-tech film for an infrared profile photodetector (3.5-5.0 μm), Physics and Chemistry of Solids, 2024, 25(4):757-763, <https://doi.org/10.15330/шт.25.4.757-763>

10. Demchenko V.G., Development of multifunctional camouflage material, Central Research Institute of Armaments and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine, Current problems of military-technical policy and directions of arming the Armed Forces of Ukraine under martial law, Abstracts of reports at the X International Scientific and Technical Conference, 2024, Kyiv, p. 231

11. Wang, T., Wu, Y., Shi, L. et al, A structural polymer for highly efficient all-day passive radiative cooling. *Nat Commun* 12, 365, 2021, <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20646-7>
12. Bin Zhao, Mingke Hu, Xianze Ao, Nuo Chen, Gang Pei, Radiative cooling: A review of fundamentals, materials, applications, and prospects, *Applied Energy*, Volume 236, February 2019, Pages 489-513, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.018>
13. Ablimit Aili, Tengyao Jiang, Jingjing Chen, Yonggang Wen, Ronggui Yang, Xiaobo Yin, Gang Tan, Passive daytime radiative cooling: Moving beyond materials towards real-world applications, *Next Energy* Volume 3, April 2024, 100121, <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2024.100121>
14. Mudasir Akbar Shah, Bilal Masood Pirzada, Gareth Price, Abel L. Shibiru, Ahsanulhaq Qurashi, Applications of nanotechnology in smart textile industry: A critical review, *Journal of Advanced Research*, Volume 38, May 2022, Pages 55-75, <https://doi.org/10.1016/j.jare.2022.01.008>
15. Yetisen, Ali K., et al. "Nanotechnology in textiles." *ACS nano* 10.3, 2016: 3042-3068, <https://doi.org/10.1021/acs.nano.5b08176>

Отримано 22.09.2025

Received 22.09.2025

Прийнято до друку 04.11.2025
Accepted for publication 04.11.2025