

УДК 536.33

Аналитический обзор пассивных радиационных систем охлаждения

С. КАМАРА¹, д-р техн. наук А. Б. СУЛИН²¹camarasoumailas@gmail.com, ²miconta@rambler.ru

Университет ИТМО

Пассивное радиационное охлаждение является одним из методов, используемых для снижения энергопотребления и защиты окружающей среды. Пассивное охлаждение включает в себя технологии и конструктивные решения для охлаждения зданий и других объектов при минимальном потреблении энергии. Данная технология наиболее перспективна для обеспечения теплового комфорта в регионах с жарким климатом. Кроме того, она также может быть использована для хранения сельскохозяйственной продукции, что важно с точки зрения продовольственной безопасности. В выполненном обзоре структурирована информация по дневным, ночным и круглосуточным системам пассивного радиационного охлаждения.

Ключевые слова: пассивное радиационное охлаждение, селективные облицовочные материалы, излучающий радиатор, атмосферное окно.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 16.04.2020, принята к печати 12.05.2020

DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-2-37-44

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Камера С., Сулин А. Б. Аналитический обзор пассивных радиационных систем охлаждения // Вестник Международной академии холода. 2020. № 2. С. 37–44.

Analytical review of passive radiative cooling systems

S. CAMARA¹, D. Sc. A. B. SULIN²¹camarasoumailas@gmail.com, ²miconta@rambler.ru

ITMO University

Passive radiative cooling is one of the methods used to reduce energy consumption and protect the environment. Passive cooling includes technologies and design solutions to cool buildings with minimal energy consumption. This technology is considered to be cheap with simple techniques, that can ensure comfort in the building in regions having hot climate. In addition, this technology can also be used for the preservation of agricultural products and other materials at low temperature. However, this study indicates the current state and an analytical review of the scientific and technical literature on passive daytime and night radiative cooling systems. Data are collected in tables that can be used to select night, day and/or night-day radiator coatings for their application in passive radiative cooling system technology.

Keywords: microclimate, thermal comfort, equivalent temperature, life support systems.

Article info:

Received 16/04/2020, accepted 12/05/2020

DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-2-37-44

Article in Russian

For citation:

Camara S., Sulin A. B. Analytical review of passive radiative cooling systems. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2020. No 2. p. 37–44.

Введение

Непрерывная промышленная деятельность и постоянно растущие требования к комфорту приводят к все большему энергопотреблению [1]. Только строительство потребляет 32,8–35,3% энергии [2]. По данным источникам [3, 4], общая потребность в энергии и выбросы CO₂ возрастут с начала века к 2030 г. на 60%. Этот спрос при-

водит к истощению первичных источников энергии, таких как ископаемое топливо (ИТ) [4, 5] и к увеличению уровня парниковых газов. По данным [6] в 2017 г. от ИТ вырабатывалось 85,2% энергии против 3,5% от возобновляемых источников энергии без учета гидроэнергетики.

Развитие технологии энергоэффективных зданий в значительной степени сократило зависимость отопле-

ния помещений от ИТ [7], но спрос на энергию для охлаждения и кондиционирования воздуха продолжает расти из-за увеличения тепловых нагрузок, изменений в архитектуре зданий и, прежде всего, из-за роста спроса на внутренний комфорт [8].

Отметим, что сектор холодильной промышленности заметно изменился после Киотского протокола 2015 г., рекомендующего использовать солнечную энергию в системах отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха и охлаждения. Учитывая, что спрос на охлаждение увеличивается с интенсивностью солнечного излучения, солнечное охлаждение представляется логичным решением [8, 9].

Таким образом, использование солнечной (фотоэлектрической или тепловой) энергии может внести важный вклад в достижении целей изменения климата и энергетической безопасности, особенно в периоды пикового спроса на охлаждение и отопление, соответственно летом и зимой. Среднегодовой общий потенциал ресурсов солнечной энергии составляет около $1,6 \text{ МВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, что значительно превышает общий средний спрос на энергию на единицу площади [9].

Теплообмен излучением является одним из наиболее распространенных естественных методов передачи энергии [10]. Принято считать, что реликтовая температура космоса близка к абсолютному нулю [11]–[13]. Образование инея путем испускания инфракрасного излучения от Земли к холодному ночному небу в ясную ночь является наглядным примером потери тепла к небу радиационным охлаждением. В связи со сложным характером атмосферы, Земля имеет ряд окон с низким поглощением, которые прозрачны для инфракрасного излучения (так называемые «атмосферные окна») [12, 14]. Наиболее важное окно для радиационного охлаждения находится в диапазоне длин волн 8–14 мкм [11]–[17]. Именно через это окно происходит большая часть передачи энергии, связанной с радиационным охлаждением [13]. Хотя радиационное охлаждение более эффективно в ночное время, тепло также может излучаться в течение дня при условии, что поверхность радиатора находится в тени солнца [14].

Пассивное радиационное охлаждение — это метод охлаждения, основанный на способности некоторых конструкций рассеивать тепло своей внешней поверхностью с уменьшением собственной температуры. Возможность изменения радиационных свойств объекта представляет большой практический интерес и имеет важное значение для различных областей техники и прикладной физики. Спектры теплопоглощения тела можно регулировать путем изменения геометрии конструкции и применения материалов с высокой излучающей и отражательной способностью [11, 16].

Таким образом, может быть достигнуто дневное радиационное охлаждение ниже комнатной температуры. Такого типа радиаторы демонстрируют высокое отражение в полосе солнечного излучения (длина волны 0,3–4,0 мкм), в то же время сильно излучая в прозрачное атмосферное окно, обеспечивая дневное радиационное охлаждение [11, 12].

Целью первых исследований радиационного охлаждения было выявление природных или искусственных материалов, обеспечивающих данные свойства. Идеаль-

ные материалы, используемые для радиационного охлаждения, должны иметь максимальную отражательную способность при коротковолновом излучении в диапазоне длин волн 0,25–2,8 мкм, при том, что максимальная плотность солнечной энергии приходится на диапазон 0,3–2,2 мкм. При этом максимальная эмиссионная способность должна быть близка к единице в полосе «атмосферного окна» 8–14 мкм и равна нулю в остальной части диапазона длин волн 14–80 мкм.

В настоящее время выполнено много исследований по поиску материалов покрытий для дневных, ночных и комбинированных радиаторов, например, [10, 11, 18–21]. Обзоры в области пассивного радиационного охлаждения приведены, например, в работах [12, 17, 25]. Схемные решения систем радиационного охлаждения представлены в [10, 16, 23, 24]. В настоящее время исследования сосредоточены на разработке гибридных пассивных радиационных систем охлаждения, работающих 24 ч в сутки в различных диапазонах длин волн. Удовлетворительные результаты достигнуты в разработке комбинированных систем пассивных радиационной системы для отопления и охлаждения с использованием одного радиатора, а также систем ночного радиационного охлаждения в комбинации с прямым испарительным охлаждением [18, 25, 26].

В данном обзоре выполнен анализ различных пассивных радиационных систем охлаждения с последующим аналитическим и сравнительным обзором этих пассивных радиационных систем охлаждения с моделями конструкций материалов панелей радиаторов для их применения в регионах с жарким климатом.

Основные классы радиационных систем охлаждения

При оценке охлаждающего потенциала радиационных охладителей необходимо учитывать спектр излучения, поступающего на поверхность Земли. Облучение земной поверхности осуществляется двумя различными источниками. Одним источником являются компоненты атмосферы, другим — рассеянное солнечное излучение, которое присутствует только днем. Атмосферное излучение ограничено длинами волн более 4 мкм и присутствует 24 ч. В течение дня преобладает солнечное излучение с длинами волн менее 2,5 мкм [1, 16].

Как правило, излучение может быть частично поглощено, отражено или пропущено через тело. Поглощение α , отражение ρ и пропускание τ тела связаны отношением [11]

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

Согласно данным автора Ahmad M. I. et al [15], одним из наиболее перспективных подходов к экономии энергии в зданиях естественными средствами является метод пассивного охлаждения с использованием нескольких факторов. Этими факторами являются: окружающий воздух, теплообмен с которым осуществляется конвекцией; небо, теплообмен с которым осуществляется с помощью длинноволнового излучения внутри от поверхностей здания; вода, теплообмен с которой происходит путем испарения, естественными методами теплопередачи или побудителями расхода. Ниже приведен анализ основных технических решений в рассматриваемой области.

Ночные пассивные радиационные системы охлаждения

Для эффективного ночного радиационного охлаждения в основном применяются два типа радиаторов. Первый тип радиатора — это черный радиатор, который обладает высокой излучающей способностью почти во всех диапазонах теплового излучения. Второй тип радиатора — селективный радиатор, который обладает сильным тепловым излучением только в диапазоне длин волн «атмосферного окна». По сравнению с селективным, черный радиатор обеспечивает более интенсивное охлаждение при комнатной температуре, однако дополнительное поглощение излучения за пределами атмосферного окна снижает его эффективность [11, 12]. На рис. 1 изображена панель радиатора ночного радиационного охлаждения, излучающая тепло в окружающее пространство.

В обзоре М. Zeyghami et al. [17] представлены данные о структурах радиационного охлаждения с параметрами их производительности. Для условий тропического климата Малайзии М. Hanif et al. [23] был изучен и оценен потенциал радиационного охлаждения, а также установлена корреляция между мощностью радиационного охлаждения и разностью температур между окружающим воздухом и ночным небом в десяти разных местах с различными климатическими данными. Плоская крыша использовалась в качестве радиатора для отвода тепла в более холодное ночное небо для целей охлаждения. Анализ выполнен для различных условий неба, ясных и покрытых облаками. Полученная холодопроизводительность составляла $43,9 \text{ Вт/м}^2$ по состоянию на 2 декабря при облачном небе и разности температур $9,55 \text{ }^\circ\text{C}$. При ясном небе со средней разностью температур $10,53 \text{ }^\circ\text{C}$, 13 декабря была достигнута мощность охлаждения 48 Вт/м^2 . Согласно данным исследованиям, радиационное излучение может сэкономить до 25% потребления энергии для целей охлаждения. В. Vokor et al. [27] разработали математическую модель для описания процесса ночного охлаждения пассивным излучателем из гофрированной металлической пластины, которая используется в солнечных аэростатах, работающих в качестве излучающего экрана. Авторами, с помощью программного обеспечения энергомоделирования зданий Retscreen 4 Clean Energy Project Analysis, на примере че-

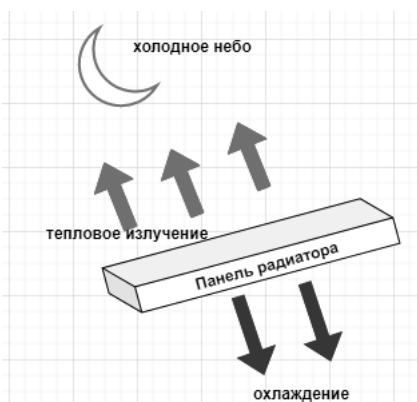


Рис. 1. Схема радиатора ночного пассивного радиационного охлаждения

Fig. 1. Diagram of the night passive radiation cooling radiator

тырех европейских столиц показано, что в районах с сухим климатом достигаются более высокие показатели ночного радиационного охлаждения, поскольку содержание влаги в атмосфере влияет на радиационную передачу тепла. Yi Man et al. [28] также спроектировали и разработали аналитическую модель радиатора ночного охлаждения, работающего как дополнительный отвод тепла от активной системы охлаждения. John Hollick [29] провел испытание ночного радиационного охлаждения от солнечного коллектора, обращенного к ясному ночному небу. Испытания подтвердили, что ночное радиационное охлаждение может охлаждать окружающий воздух для использования в здании на $4,7 \text{ }^\circ\text{C}$ при комнатной температуре. Еще одно экспериментальное исследование гибридной системы, сочетающей систему ночного охлаждения, змеевика и прямого испарительного охлаждения, было проведено G. Heidarinejad et al. [30] в Тегеране (Иран). В течение одной ночи ночное радиационное охлаждение обеспечивает получение охлажденной воды для аккумулятора холода. При испытаниях данной гибридной системы достигнуто понижение температуры воздуха примерно на $13,5 \text{ }^\circ\text{C}$. М. Farmahini-Farahani et G. Heidarinejad [31] также провели исследование гибридной системы, сочетая радиационную систему охлаждения с двухступенчатой испарительной системой охлаждения в четырех разных городах с различными погодными условиями в Иране. Показано, что данная система способна снизить температуру воздуха на $24,2 \text{ }^\circ\text{C}$ в Табасе; $20,1 \text{ }^\circ\text{C}$ в Ахвазе; $20,6 \text{ }^\circ\text{C}$ в Кермане и $20,2 \text{ }^\circ\text{C}$ в Тегеране. Коэффициент энергоэффективности многоступенчатой системы колеблется от 48,8% до 58,8%. Другой тип гибридной системы охлаждения, включающей тепловой насос для охлаждения удаленных центров обработки данных, был представлен А. Amig и R. Van Hou [25]. Авторами разработана математическая модель анализа тепловых затрат и жизненного цикла, включая логику управления системой. Разработанная модель имеет возможность имитировать широкий спектр возможных конфигураций систем с использованием локальных и зависящих от места погодных условий в течение нескольких лет. В результате определяется оптимальная конфигурация системы, обеспечивающая минимизацию затрат за жизненный цикл.

Таким образом, можно отметить, что максимальное снижение температуры непосредственно на панелях радиаторов пассивного излучения ночью составляет около $10\text{--}11 \text{ }^\circ\text{C}$. Использование комбинированных пассивных технологий охлаждения, таких как сочетание ночного радиационного охлаждения с непосредственным испарением воды, позволяет достичь значительно более существенного понижения температуры. В то же время эффект пассивного охлаждения может достигаться также с использованием радиационных панелей в дневное время.

Дневные пассивные радиационные системы охлаждения

Несмотря на то, что пассивное радиационное охлаждение более эффективно ночью, в дневное время теплота также может излучаться при условии, что поверхность радиатора находится в тени солнца [14].

В течение дня на поверхности, обращенной к небу, доминирует солнечное облучение на коротких длинах волн 0,3–2,5 мкм, при этом поток солнечного излучения может составлять порядка 1000 Вт/м². Достижение значительного дневного радиационного охлаждения в большой степени зависит от предотвращения поглощения солнечного излучения. Двумя известными способами достижения этой цели являются либо предотвращение попадания нежелательного спектра в радиатор через частично прозрачный экран, либо отражение солнечного облучения через отражатель, расположенный за радиатором. Защитный экран отражает солнечное облучение и в то же время прозрачен на длинах волн внутри «атмосферного окна», что позволяет расположенному за экраном радиационному охладителю излучать тепло в космос в течение дня [17].

В обзоре [17] представлены различные модели селективных излучателей для применения в дневном радиационном охлаждении с описанием и информацией о параметрах их производительности. Аналогичное исследование данного процесса проводилось и в работе [22]. Радиаторы с более совершенными покрытиями и различными технологиями укладки тонких пленок для пассивного дневного радиационного охлаждения представлены М. А. Кесебас et al. [32]. Авторами показано, что повторяющиеся периодические слои позволяют избежать сильного поглощения в видимых и близких инфракрасных спектрах благодаря металлическому слою и широкополосному отражению в этих частотных диапазонах. В первой структуре значительное повышение производительности достигается за счет добавления слоев Al₂O₃, которые имеют высокую абсорбцию вокруг длины волны 10 мкм. Сочетание SiO₂, TiO₂ и Al₂O₃, которые имеют различные пики спектрального поглощения, дало значительное улучшение эмиссии. Во второй структуре более эффективное использование серебряного слоя (Ag) было достигнуто с периодическими слоями. Использование периодических структур для инфракрасного излучения также приводит к высокому излучению в спек-

тре 8–13 мкм. Благодаря использованию периодических слоев TiO₂ и SiO₂, авторы получили мощность радиационного охлаждения около 100 Вт/м², в то время как предложенные ранее радиаторы обеспечивали производительность около 35 Вт/м². По данным Jianshu Fan et al. [20], трехслойная плоская структура, состоящая из покрытия 8YSZ, пластины SiO₂ и серебряной пленки (Ag) в опытном образце дневного пассивного радиационного охлаждения при прямом солнечном облучении и в сухой среде показала мощность охлаждения 95,1 Вт/м². Исследования при различной влажности воздуха показали, что предлагаемая структура может улучшить чистую мощность охлаждения в условиях высокой влажности по сравнению с корпусом без покрытия данной структурой.

Новый неорганический материал фосфат алюминия (AlPO₄) был использован для дневного пассивного радиационного охлаждения в Гуанчжоу (Китай) Na Li et al. [33]. Этот материал имеет высокую солнечную отражательную способность и высокую среднюю инфракрасную излучающую способность. Результаты показали, что повышение температуры термической обработки приводит к увеличению отражательной способности, но, одновременно, — к снижению средней инфракрасной излучательной способности. Эффект многогранных структурных различий у фосфата алюминия тридимитного типа, изготовленного при температуре 700 °С, демонстрирует высокую отражательную способность 0,97 и селективную эмиссию с излучательной способностью 0,9 в диапазоне длин волн 8–13 мкм.

Elvire Katramiz et al. [34] была разработана математическая модель для изучения производительности гибридной системы охлаждения офисного пространства в жарком и сухом климате в городе Вежаа (Ливан). Панель дневного радиационного охлаждения соединена с системой аккумулирования тепла, работающей на принципе фазового перехода. При этом мощность ночного радиационного охлаждения использовалась для регенерации аккумулятора холода в ночное время, а мощность, вырабатываемая в дневное время, использовалась для снижения температуры окон. Установлено, что вырабатываемая днем холодильная мощность для охлаждения окон снижает емкость аккумулятора холода на 12,3%, по сравнению с использованием только ночного охлаждения. Охлаждение окон уменьшило асимметрию излучения в офисе и позволило сэкономить 10% энергии при его работе в течение лета.

Таким образом, экспериментальные исследования показали потенциал пассивного радиационного охлаждения. Понижение температуры от 4,2 до 12 °С может быть получено с помощью различных материалов селективных конструкций, наносимых на поверхности панелей дневных радиаторов. Общим базовым материалом, используемым для рассеивания тепла в пространстве по данным большинства источников, является диоксид кремния (SiO₂).

Для повышения производительности пассивных радиационных систем охлаждения многие исследования также были сосредоточены на гибридных системах и дали лучшие результаты по сравнению с единственным вариантом использования радиатора дневного охлаждения. Тем не менее, с целью повышения производительности

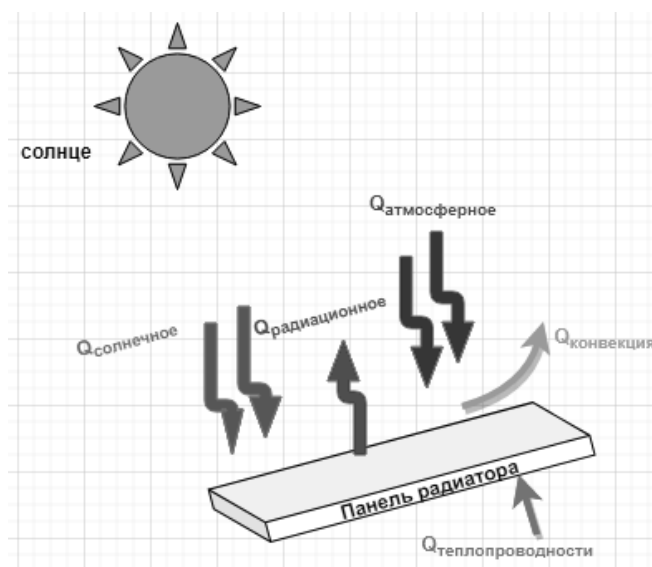


Рис. 2. Схема радиатора дневного пассивного радиационного охлаждения

Fig. 2. Diagram of the daytime passive radiation cooling radiator

пассивных радиационных систем, многие теоретические и экспериментальные исследования также сосредоточены на разработке радиаторов комбинированного дневного/ночного охлаждения и нагрева.

Дневные/ночные пассивные радиационные системы

Работы, проведенные В. Zhao et al. [10], показали, что на характеристики радиационного охлаждения влияют не только параметры спектральных селективных излучателей, но и состояние атмосферы. Авторы провели экспериментальную демонстрацию в течение дня в полевых условиях с использованием зеркального излучателя из двуокиси кремния (SiO_2), изготовленного путем осаждения серебра (Ag) толщиной 150 нм и SiO_2 толщиной 50 нм на подложке из SiO_2 толщиной 500 мкм. Результаты испытаний на открытом воздухе показали, что зеркальный излучатель SiO_2 поддерживает среднюю температуру около $5,9^\circ\text{C}$ ниже температуры окружающей среды во время эксперимента в Пекине (116°E , 40°N). При этом результаты испытаний существенно хуже в городе Хэфэй, Китай (117°E , 32°N) из-за влажности в этом регионе. Аналогичный эксперимент описан в [11] авторами С. С. Дженблат и О. В. Волковой. Излучатель представлял собой пленку толщиной 700 мкм из сфер SiO_2 толщиной 2 мкм, нанесенную на площадку размером $2,5 \times 2,5$ см, окрашенную в черный цвет. Поглощающая способность излучателя в солнечном спектре составляла 0,02. В течение дня радиатор позволял опускать температуру поверхности почти на 12°C ниже комнатной температуры, что почти на 7°C больше, чем у известных коммерческих отражающих красок. Кроме того, работы N. F. Cunha et al. [21] [21] были сосредоточены на многослойном покрытии на основе $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{SiNx}/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$, подготовленном для пассивного радиационного селективного охлаждения магнетронным катодным распылением. Устройство характеризуется как низким отражением (высоким излучением) в «атмосферном окне» неба (диапазон длин волн от 8 до 13 мкм), так и высоким отражением в других диапазонах, что позволяет снизить температуру в среднем на $7,4^\circ\text{C}$ в ночное время зимой, что соответствует чистой мощности охлаждения $43 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Другой тип пассивного радиационного охладителя на основе алюминия, который сочетает наночастицы двуокиси кремния с анодной моделью оксида алюминия с помощью очень простого метода погружения, представлен Dengwu Liu et al. в работе [35]. Охладитель избирательно излучает в «атмосферное окно», имея низкую поглощающую способность за пределами атмосферного окна без конвекционных экранов. Обнаружено, что температура охладителя значительно ниже, чем температура окружающего воздуха в течение дня. Среднее снижение температуры на $4,7^\circ\text{C}$ было достигнуто в дневное время и на $5,3^\circ\text{C}$ в ночное время.

В работе А. Aili et al. [24] приведены результаты экспериментальных исследований и моделирования радиационной системы охлаждения, работающей круглосуточно. Исследовалось влияние изменения расхода воды на мощность охлаждения и снижение температуры. При отсутствии расхода воды снижение температуры составляло $5\text{--}7^\circ\text{C}$. Испытание системы в дневное время на ох-

лаждение при низком расходе воды $0,227 \text{ л}/(\text{мин}\cdot\text{м}^2)$ приводит к максимальному снижению температуры на $4,0^\circ\text{C}$ при средней мощности охлаждения около $80 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Моделирование работы данной системы для типичного метеорологического года (г. Финикс, США) показывает, что система может генерировать до $350 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ холода (или $26 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$) с понижением температуры относительно окружающей среды $4\text{--}5^\circ\text{C}$ при низком расходе воды $0,1 \text{ л}/(\text{мин}\cdot\text{м}^2)$ в течение типичного летнего месяца. В работе Yijia Huang et al. [19] описано компактное плоское устройство, работающее в инфракрасном диапазоне ($3\text{--}12 \text{ мкм}$), которое имеет высокий диапазон излучения на длинах волн от 5 мкм до 8 мкм . Структура излучателя состоит из семи чередующихся слоев фторида кальция (CaF_2) и германия (Ge) различной толщины на тонкой металлической пленке никрома, за которой следует слой Ge в качестве диэлектрической прокладки, все из которых осаждаются на отражающем слое никрома. Оптимизация толщины каждого слоя выполнена с помощью генетического алгоритма. Данный тип излучателя является чисто пассивным без применения теплоносителя и может быть особенно полезен для применения в астрономии и авиации.

Экспериментальное исследование комбинированной радиационной системы ночного охлаждения и солнечной системы дневного отопления на основе композитной поверхности представлено Mingke Hu et al. [18]. Композитная поверхность представляет собой комбинацию селективного поглотителя на основе титана (Ti) с полиэтилентерефталатом (ПЭТ). В тестовом режиме днем тепловая эффективность устройства составляла $62,7\%$, что примерно на $86,4\%$ больше, чем у традиционного плоского коллектора солнечного отопления. В ночном режиме мощность радиационного охлаждения составила $50,3 \text{ Вт}/\text{м}^2$ в ясную ночь и $23,4 \text{ Вт}/\text{м}^2$ в облачную ночь. Аналогичное исследование гибридной системы солнечного нагрева воды и ночного радиационного охлаждения с использованием одного коллектора / радиатора для обеих функций было рассмотрено G. N. Nwaji et al. [24]. Авторами проанализированы факторы, ограничивающие внедрение такого типа гибридных систем, перспективы и технические трудности, а также предложения о путях их совершенствования. Этот эксперимент был реализован в пяти нигерийских городах с различными климатическими условиями [36]. Гибридный солнечный коллектор с плоской пластиной/ночным радиатором (SCONOR) состоит из спектральной селективной абсорбирующей поверхности того же типа, что и структура, используемая в [18]. Выполнено математическое моделирование переходных тепловых режимов гибридного солнечного коллектора/ночного радиатора для солнечного нагрева/охлаждения воды в разных городах. Показано, что максимальная температура воды, достигаемая при дневном нагреве, составляла $84,6^\circ\text{C}$, $75,61^\circ\text{C}$, $86,4^\circ\text{C}$, $88,33^\circ\text{C}$ и $93,67^\circ\text{C}$, а в период ночного охлаждения минимальная температура воды составляла $20,21^\circ\text{C}$, $20,12^\circ\text{C}$, $21,9^\circ\text{C}$, $20,95^\circ\text{C}$ и $22,01^\circ\text{C}$, соответственно для Оверри, Порт-Артура, Икеи, Майдугури и Сокото (Япония).

Таким образом, на основании анализа литературных данных следует отметить, что базовым материалом, используемым для рассеивания тепла в пространстве как

Таблица 1

Материалы покрытий для систем радиационного охлаждения

Table 1

Coating materials for radiation cooling systems

Материал	Преимущества	Источники
Полированный алюминий с покрытием из испаренного SiO_2 и Si_3N_4	Преимущество этих поверхностей проявляется в диапазоне «атмосферных окон»	[22]
Стекло, покрытое SnO_2	Покрытие препятствует образованию инея и снижению мощности излучения панелей	
Оксинитрид кремния ($\text{SiO}_2+\text{Si}_3\text{N}_4$) осаждается на алюминиевой стеклянной подложке	Отличается благоприятными оптическими свойствами многослойных конфигураций панелей и перспективен для повышения производительности устройства	
Пигментированные полиэтиленовые листы (с ZnS или ZnO) с тонкими пленками PbO	Сочетают высокую отражающую способность с высокой пропускной способностью в зоне «атмосферных окон» и являются очень прозрачными в ИК-области	
SiO_2+Ag	Структура может отражать около 97% падающего солнечного облучения и одновременно излучать интенсивное тепловое излучение	[10]
SiO_2 окрашенные в черный цвет на плите	Поглощающая способность излучателя в солнечном спектре очень мала, что позволяет иметь высокие мощности охлаждения.	[11]
$8\text{YSZ}+\text{SiO}_2+\text{Ag}$	Добавление материала 8YSZ позволяет повысить мощность охлаждения в условиях высокой влажности	[20]
$\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$	Структура характеризуется как низким отражением (высоким излучением) в «атмосферном окне» неба, так и высоким отражением в других диапазонах	[21]
$\text{SiO}_2/\text{TiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3$	Использование периодических структур для инфракрасного излучения приводит к высокому излучению в спектре 8–13 мкм с улучшением мощности охлаждения.	[32]
Фосфат алюминия AlPO_4	Материал имеет высокую солнечную отражательную способность и высокую среднюю инфракрасную излучающую способность	[33]
Анодный оксид алюминия	Структура избирательно излучает в «атмосферное окно», имея низкую поглощающую способность за пределами «атмосферного окна» без конвекционных экранов. Она дает хорошие результаты в дневное и ночное время	[35]

Таблица 2

Характеристики систем радиационного охлаждения

Table 2

Characteristics of radiation cooling systems

Публикация	Материалы для покрытия	Одиночная пассивная радиационная система охлаждения	Гибридная пассивная радиационная система охлаждения	Понижение температуры, °C		Мощность охлаждения, Вт/м ²
				днем	ночью	
S. S. Jenblat, O. V. Volkova [11]	SiO_2	+	–	12	4	—
A. Aili, et al. [24], Phoenix, Arizona, USA	Поликарбонат	+	–	4	5	80,0
B. Zhao et al. [10], Pekin	SiO_2/Ag	+	–	5,9	—	—
M. Hanif et al. [23], Malaisie	Bronze	+	–	—	9,5–10,53	43,9–48,0
Mingke Hu et al. [18], Heifei en Chine	$\text{Al}/\text{Ti}/\text{PET}$ (TPET)	—	+	—	7,2 безоблачное небо 3,8 с облаками	50,3 23,4
Jianshu Fan et al. [20]	$8\text{YSZ}/\text{SiO}_2/\text{Ag}$	+	–	10 (при скорости ветра $v=1$ м/с); 6 (при $v=3$ м/с)	—	95,1
N. F. Cunha et al. [21], Guimarães, Portugal	$\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$	+	–	2,5	7,4	43,0
Na Li et al. [33], Guangzhou, en Chine	AlPO_4	+	–	4,2	6,4	—
Muhammed Ali Kecebas et al. [32],	$\text{SiO}_2/\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	+	–	+	—	100,0
Dengwu Liu et al. [35], DaLi, en Chine.	Анодный оксид алюминия (AOA)	+	+	4,7	5,3	+
Ghassem Heidarinejad et al. [30], Téhéran	Не застекленный плоский коллектор	+	+	—	13,5	+
Elvire Katramiz et al. [34], Beqaa au Liban	$\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$	—	+	8,12–12, 35	—	—

днем, так и ночью, является диоксид кремния (SiO₂). Сочетание этого материала с другими материалами, такими как алюминий и серебро позволяет достичь значительной мощности охлаждения со снижением температуры по отношению к температуре окружающей среды в диапазоне от 2,5 до 12 °С в течение дня в зависимости от погодных условий и использования, и снижения температуры в диапазоне от 4 до 7,4 °С в ночное время. В табл. 1 представлены основные материалы покрытий, используемые для радиационного охлаждения.

В табл. 2 приведены характеристики некоторых наиболее перспективных систем пассивного радиационного охлаждения.

Заключение

В общем случае, радиационное охлаждающее устройство не может выступать в качестве нагревающего солнечного коллектора в течение дня, потому что радиатор имеет чрезвычайно низкое спектральное поглощение в длине волны солнечного излучения (то есть 0,2–3 мкм). И наоборот, традиционный солнечный коллектор не может выступать в качестве радиатора ночного охлаждения из-за его чрезвычайно низкой излучательной способности в диапазоне длин волн «атмосферного окна». Для решения данной проблемы разрабатываются новые классы селективных инфракрасных излучателей, включая фотонные структуры и метаматериалы [10, 11, 18–22, 24, 25, 30, 33–35]. Эти радиаторы нового типа демонстрируют высокое отражение в полосе солнечного излучения (то есть от 0,3 до 4,0 мкм), при этом сильно излучая в диапазоне длин волн «атмосферного окна», обеспечивая существенное дневное радиационное охлаждение. Следует отметить, что большинство этих радиаторов были исследованы на лабораторном уровне. Кроме того, некоторые из этих материалов, используемых в качестве покрытия, не имеют значительного срока службы для дневного использования из-за эффекта солнечного излучения.

В работах [19, 30–34] приведены результаты исследований гибридных радиационных систем. Показатели данных систем лучше по сравнению с простым пассивным радиационным охлаждением. Анализ показывает, что большинство исследований данной направленности выполняется в странах, где температура окружающей среды не очень высока в течение лета. Производительность этих систем ограничена при наличии влаги и облачности [37, 38]. По литературным данным применение систем ночного радиационного охлаждения, где охлаждающий эффект, полученный в течение ночи, используется на следующий день для целей охлаждения, ограничено в регионах с теплым климатом, особенно в районах, где средняя температура в летнее время превышает 35 °С. В большинстве исследований по пассивному радиационному охлаждению зафиксировано снижение температуры от 4 до 12 °С, по сравнению с температурой окружающей среды, что указывает на необходимость продолжения исследований в данном направлении.

Литература/References

- Asadi Javad etc. Thermo-economic analysis and multi-objective optimization of absorption cooling system driven by various solar collectors. *Energy Conversion and Management*. 173 (2018) 715–727. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.013>
- Nanda Arun Kumar, Panigrahi C. K. A state of the art review of solar passive building system for heating or cooling purpose. *Front. Energy*. 2016. 10 (3): 347–354. DOI: 10.1007/s11708-016-0403-0
- Commissariat de l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA) — Memento sur l'énergie-2018, Gif-sur-Yvette cedex- France.
- Liming Liu and al. Energetic, economic and environmental study of cooling capacity for absorption subsystem in solar absorption-subcooled compression hybrid cooling system based on data of entire working period. *Energy Conversion and Management*. 2018. Vol. 167. P. 165–175, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.102>
- Abdul Ghafoor & Anjum Munir. Worldwide overview of solar thermal cooling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 43. P. 763–774. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.073>
- British Petroleum. Statistical Review of World Energy: les chiffres clés de l'énergie dans le monde, <https://www.connaissancesenergies.org/bp-statistical-review-world-energy-2018-les-chiffres-cles-de-lenergie-dans-le-monde-180614>
- Noel Jabbour. Intégration des systèmes à absorption solaire de petites puissances aux bâtiments-approche multifonction solaire: chauffage, ECS et rafraîchissement, HAL Id: tel-00708518 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00708518>, Lyon 2011. <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2011ISAL0085/these.pdf>
- Kim D. S., Infante Ferreira C. A. Solar refrigeration options — a state-of-the-art review. *International Journal of Refrigeration*. 2008. Vol. 31. Iss. 1. P. 3–15. doi:10.1016/j.ijrefrig.2007.07.011
- Ali Shirazi and al. Solar-powered absorption chillers: A comprehensive and critical review. *Energy Conversion and Management*. 2018. Vol. 171. P. 59–81. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.091>
- Bin Zhao and al. Performance evaluation of daytime radiative cooling under different clear sky conditions. *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 155. P. 660–666.
- Дженблат С. С., Волкова О. В. Основы и перспективы применения пассивного радиационного охлаждения // Холодильная техника. 2019. № 9. с. 36–44. [Junblat C. S., Volkova O. V. Basics and prospects of application of passive radiative cooling. *Kholodil'naya Tekhnika*. 2019. No 9. p. 36–44. (in Russian)]
- Bin Zhao and al. A review of fundamentals, materials, applications, and prospects. *Applied Energy*. 2019. Vol. 236. p. 489–513. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.018>
- Xing Lu, Peng Xu & al. Cooling potential and applications prospects of passive radiative cooling in buildings: The current state-of-the-art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. November 2016, Vol. 65, P. 1079–1097. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.058>
- Bathgate S. N., Bosi S. G. A robust convection cover material for selective radiative cooling applications. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2011. Vol. 95, Iss. 10. P. 2778–2785. doi: 10.1016/j.solmat.2011.05.027
- Ahmad M. I., Jarimi H., Riffat S. Introduction: Overview of Buildings and Passive Cooling Technique. In: Nocturnal Cooling Technology for Building Applications. *Springer Briefs in Applied Sciences and Technology*. 2019. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-5835-7>

16. Ron Zevenhoven, Martin Fält. Radiative cooling through the atmospheric window: A third, less intrusive geoengineering approach. *Energy*. 2018. vol. 152. P. 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.084>
17. Zeyghami M. et al., A review of clear sky radiative cooling developments and applications in renewable power systems and passive building cooling. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2018. Vol. 178. P. 115–128. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.01.015>
18. Mingke Hu and al. Field test and preliminary analysis of a combined diurnal solar heating and nocturnal radiative cooling system. *Applied Energy*. 2016. Vol. 179. P. 899–908. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.066>
19. Yijia Huang and al., Broadband metamaterial as an “invisible” radiative cooling coat, *Optics Communications* 407 (2018) 204–207, <http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2017.09.036>, 0030–4018/© 2017 Elsevier B. V. All rights reserved.
20. Jianshu Fan and al. Yttria-stabilized zirconia coating for passive daytime radiative cooling in humid environment. *Applied Thermal Engineering*. 2020. Vol. 165. 114585.
21. Cunha N. F. Multilayer passive radiative selective cooling coating based on Al/SiO₂/SiNx/SiO₂/TiO₂/SiO₂ prepared by dc magnetron sputtering. *Thin Solid Films*. 2020. Vol. 694. 137736. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2019.137736>
22. Roxana Family, M. Pinar Mengüç. Materials for Radiative Cooling: A Review. *Procedia Environmental Sciences*. 2017. Vol. 38. 752–759. doi: 10.1016/j.proenv.2017.03.158
23. Hanif M. and al. Potential energy savings by radiative cooling system for a building in tropical climate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 32. P. 642–650. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.053>
24. Ablimit Aili and al. A kW-scale, 24-hour continuously operational, radiative sky cooling system: Experimental demonstration and predictive modeling. *Energy Conversion and Management*. 2019. Vol. 186. 586–596. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.03.006>
25. Amir A., R. van Hout. A transient model for optimizing a hybrid nocturnal sky radiation cooling system. *Renewable Energy*. 2019. Vol. 132. P. 370–380. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.114>
26. Nwaji G. N. and al. Hybrid solar water heating/nocturnal radiation cooling system I: A review of the progress, prospects and challenges. *Energy & Buildings*. 2019. Vol. 198. P. 412–430. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.017>
27. Balázs Bokor and al. Nocturnal radiation: new opportunity in building cooling, *Energy Procedia*. 2017. Vol. 112. P. 118–125. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.1072
28. Yi Man and al. A Novel nocturnal cooling radiator used for supplemental heat sink of active cooling system. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 121. P. 300–308. doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.1072
29. John Hollick. Nocturnal radiation cooling tests. *Energy Procedia*. 2012. Vol. 30. P. 930–936. doi: 10.1016/j.egypro.2012.11.105
30. Ghassem Heidarinejad and al. Investigation of a hybrid system of nocturnal radiative cooling and direct evaporative cooling. *Building and Environment*. 2010. Vol. 45. P. 1521–1528. doi:10.1016/j.buildenv.2010.01.003
31. Moien Farmahini-Farahani and Ghassem Heidarinejad. Increasing effectiveness of evaporative cooling by pre-cooling using nocturnally stored water. *Applied Thermal Engineering*. 2012. Vol. 38. P. 117–123. doi:10.1016/j.applthermaleng.2012.01.023
32. Muhammed Ali Kecebas and al. Passive radiative cooling design with broadband optical thin-film filters. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*. 2017. Vol. 198. P. 179–186. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.03.046>
33. Na Li and al. Selective spectral optical properties and structure of aluminum phosphate for daytime passive radiative cooling application. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2019. Vol. 194. 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.01.036>
34. Elvire Katramiz and al. Daytime radiative cooling: To what extent it enhances office cooling system performance in comparison to night cooling in semi-arid climate? *Journal of Building Engineering*. 2020. Vol. 28. 101020. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101020>
35. Dengwu Liua and al. A thermally stable cooler for efficient passive radiative cooling throughout the day. *Optical Materials*. 2019. Vol. 92. P. 330–334. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.04.061>
36. Nwaji G. N. et al. Investigation of a hybrid solar collector/nocturnal radiator for water heating/cooling in selected Nigerian cities. *Renewable Energy*. 2020. Vol. 145. P. 2561–2574. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.144>
37. Цой А. П., Грановский А. С., Цой Д. А., Бараненко А. В. Влияние климата на работу холодильной системы, использующей эффективное излучение в космическое пространство (часть 2/2) // Холодильная техника. 2015. № 1. С. 43–46. [Tsoy A. P., Granovsky A. S., Tsoy D. A., Baranenko A. V. Climate influence on the operation on refrigeration system using the effective radiation into space. *Kholodilnaia Tekhnika*. 2015. No 1, p. 43–46 (in Russian)]
38. Цой А. П., Грановский А. С., Цой Д. А., Бараненко А. В. Моделирование работы установки с радиационным охлаждением для кондиционирования воздуха // Вестник Международной академии холода. 2019. № 3. С. 3–14. [Tsoy A. P., Granovskiy A. S., Tsoy D. A., Baranenko A. V. Simulation of radiation cooling system for air conditioning. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2019. No 3. p. 3–14. (in Russian)].

Сведения об авторах

Камара Сумаила

Аспирант факультета низкотемпературной энергетики
Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург,
ул. Ломоносова, 9, mandserg@gmail.com

Сулин Александр Борисович

Д.т. н., доцент факультета низкотемпературной энергетики
Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург,
ул. Ломоносова, 9, miconata@rambler.ru

Information about authors

Camara Sumaila

Postgraduate student of Faculty of Cryogenic
Engineering of ITMO University, 191002,
Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, mandserg@gmail.com

Sulin Aleksander B.

D. Sc., Associate professor of Faculty of Cryogenic Engineering
of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg,
Lomonosov str., 9, miconata@rambler.ru