

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ПАССИВНОГО РАДИАЦИОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

С. С. Дженблат, О. В. Волкова

Университет ИТМО,
Россия, 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Пассивное радиационное охлаждение является перспективным направлением в области энергосбережения и защиты окружающей среды. Одним из путей повышения эффективности систем радиационного охлаждения является применение многослойных покрытий. В последние годы предложено большое количество новых материалов с высокой отражающей способностью. Это позволило создать радиаторы, обеспечивающие среднюю суточную холодопроизводительность до 100 Вт/м^2 в дневное время. На основании разработанной математической модели проведена оценка оптических свойств многослойного покрытия для системы радиационного охлаждения и определена холодопроизводительность радиатора с использованием покрытия в климатических условиях Сирии (г. Латакия). Представлены результаты атмосферного излучения в летние месяцы в г. Латакия. Разработанная математическая модель, методики моделирования атмосферного пропускания, расчета солнечного излучения, оценки оптических свойств покрытий, позволяют определить эффективное покрытие для систем дневного радиационного охлаждения в любых климатических условиях.

Ключевые слова: пассивное радиационное охлаждение, многослойное покрытие, коэффициент пропускания атмосферы, метод перехода-матрица, Сирия (г. Латакия).

Введение

Пассивное радиационное охлаждение, основанное на способности предметов рассеивать тепло внешней поверхностью в космическое пространство, является актуальным направлением развития энергосберегающих технологий в странах с жарким, сухим климатом. Пассивное охлаждение включает технологии и конструктивные решения, разработанные для охлаждения зданий с минимальным потреблением энергии, и может внести значительный вклад в снижение глобального потепления при реализации в больших масштабах. Оно позволяет использовать простую и недорогую технику для обеспечения комфортной температуры в помещениях, в регионах с жарким климатом и может быть использовано для хранения овощей, фруктов, продуктов питания, жидкостей и других материалов при температуре ниже температуры окружающей среды [1].

Исследованиями в области пассивного радиационного охлаждения занимаются в России [1–6], США [7–12], Китае [13–17], Австралии [18], Бразилии [19], Марокко [20], Греции [21] и Индии [22]. Оценка зон перспективного использования радиационного охлаждения показала, что Сирия обладает высоким потенциалом для его использования [23], однако исследований в этой области в Сирии не проводилось.

Для оценки потенциала охлаждения радиационных охладителей необходимо учитывать спектр поступающего излучения на земную поверхность. Спектры теплового поглощения тела можно регулировать путем изменения геометрии конструкции и применением материалов, имеющих высокую отражающую способность [24]. В настоящее время

для систем дневного радиационного охлаждения предложено большое количество покрытий [1, 25], однако отсутствует научно обоснованная методика выбора наиболее эффективного покрытия, обеспечивающего максимальное охлаждение различных объектов с учетом климатических условий.

В статье представлены результаты исследования потенциала радиационного охлаждения путем моделирования пропускания атмосферы в летние месяцы и оценки эффективности использования многослойного покрытия, предложенного Раманом, в Сирии (г. Латакия) ($35^\circ 31' 52'' \text{ N}$, $35^\circ 47' 13'' \text{ E}$).

Теоретические основы радиационного охлаждения

Земля получает энергию от Солнца и излучает такое же количество тепловой энергии для поддержания энергетического баланса. Облучение земной поверхности вызвано двумя разными источниками. Одним из источников является рассеянное солнечное излучение, которое присутствует только в дневное время, а другим — излучение атмосферы. Испускаемое атмосферное излучение практически ограничивается длинами волн от 4 до 25 мкм и присутствует в течение дня и ночи. В дневное время доминирующим является солнечное излучение с длинами волн от 0,3 до 2,5 мкм [1, 26]. Поступающее солнечное излучение может отражаться или рассеиваться молекулами воздуха и облаками в атмосфере. Разница между тепловым излучением восходящих и нисходящих потоков определяет эффективное излучение на уровне земной поверхности.

Любой объект с конечной температурой на поверхности земли излучает энергию в форме электромагнитных волн. Большая часть энергии про-

Таблица 1. Среднемесячное содержание компонентов атмосферы в летние месяцы в Латакии
 Table 1. Average monthly content of atmospheric components in the summer months in Latakia

Месяц	Общее количество водяного пара в столбе воздуха (atm-cm)	O ₃ (atm-cm)	CO (ppmv)	CO ₂ (ppmv)	CH ₄ (ppmv)	Альбедро
Июнь	2775,216	0,3105	0,145	422,145	1,798	0,34
Июль	3192,049	0,291	0,148	418,863	1,784	0,34
Август	3222,888	0,2890	0,147	416,254	1,831	0,310
Сентябрь	3095,169	0,2788	0,159	418,471	1,851	0,297

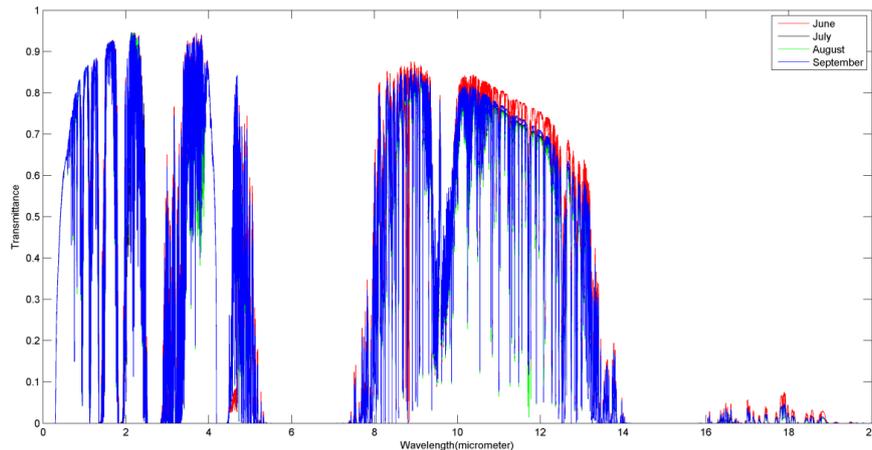


Рис. 1. Зависимость коэффициента пропускания атмосферы от длины волны для летних месяцев в Латакии
 Fig. 1. Dependence of the atmospheric transmittance on the wavelength for summer months in Latakia

ходит через «атмосферные окна», прозрачные для инфракрасного излучения. Основное атмосферное окно находится в диапазоне длин волн от 8 до 13 мкм [23, 27].

Холодопроизводительность системы радиационного охлаждения в ночное время P_{cool} (Вт/м²) определяется как разница между мощностью, излучаемой конструкцией, и поглощенной мощностью падающего атмосферного теплового излучения, с учетом потерь мощности из-за конвекции и теплопроводности [1, 25]:

$$P_{cool}(T_s, T_a) = P_{rad}(T_s) - P_{atm} - P_{cond-conv}. \quad (1)$$

Радиационный тепловой поток, излучаемый поверхностью в окружающую среду P_{rad} (Вт/м²), определяется по формуле [7, 9]:

$$P_{rad}(T_s) = A \int_0^{\frac{\pi}{2}} 2\pi d\theta \sin\theta \cos\theta \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} d\lambda I_{bb}(T_s, \lambda) \epsilon_s(\lambda, \theta), \quad (2)$$

где $\epsilon_s(\lambda, \theta)$ — спектральная и направленная излучающая способность поверхности радиатора; A — площадь поверхности многослойной структуры, м²; θ — зенитный угол, градус; T_s — температура поверхности многослойной структуры, К; T_a — температура окружающей среды, К; $I_{bb}(T_s, \lambda)$ — спектральная интенсивность черного тела при температуре T_s , определяется по формуле:

$$I_{bb}(\lambda, T_s) = \frac{2\bar{h}c_o^2}{\lambda^5 [\exp(\bar{h}c_o/\lambda KT_s) - 1]}, \quad (3)$$

где \bar{h} — постоянная Планка, $6,62606957 \cdot 10^{-34}$ м²·кг/с; c_o — скорость света в вакууме, $3 \cdot 10^8$ м/с; K — постоянная Больцмана, $1,3806488 \cdot 10^{23}$ м²·кг/с²·К; λ — длина волны, мкм.

Поглощенная мощность падающего атмосферного теплового излучения P_{atm} (Вт/м²), рассчитывается по формуле [7, 9]:

$$P_{atm}(T_a) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} 2\pi d\theta \sin\theta \cos\theta \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} d\lambda I_{bb}(T_a, \lambda) \epsilon_{atm}(\lambda, \theta) \epsilon_s(\lambda, \theta), \quad (4)$$

где $\epsilon_{atm}(\lambda, \theta)$ — угловая излучающая способность атмосферы, которая определяется по формуле [28]:

$$\epsilon_{atm}(\lambda, \theta) = 1 - \tau_{atm}(\lambda)^{1/\cos\theta}, \quad (5)$$

где $\tau_{atm}(\lambda)$ — коэффициент пропускания атмосферы в зенитном направлении.

Коэффициент пропускания атмосферы зависит от количества водяного пара в вертикальном столбе атмосферы и массы воздуха. С помощью веб-сайта MODTRAN [29] был определен коэффициент пропускания инфракрасного излучения атмосферы

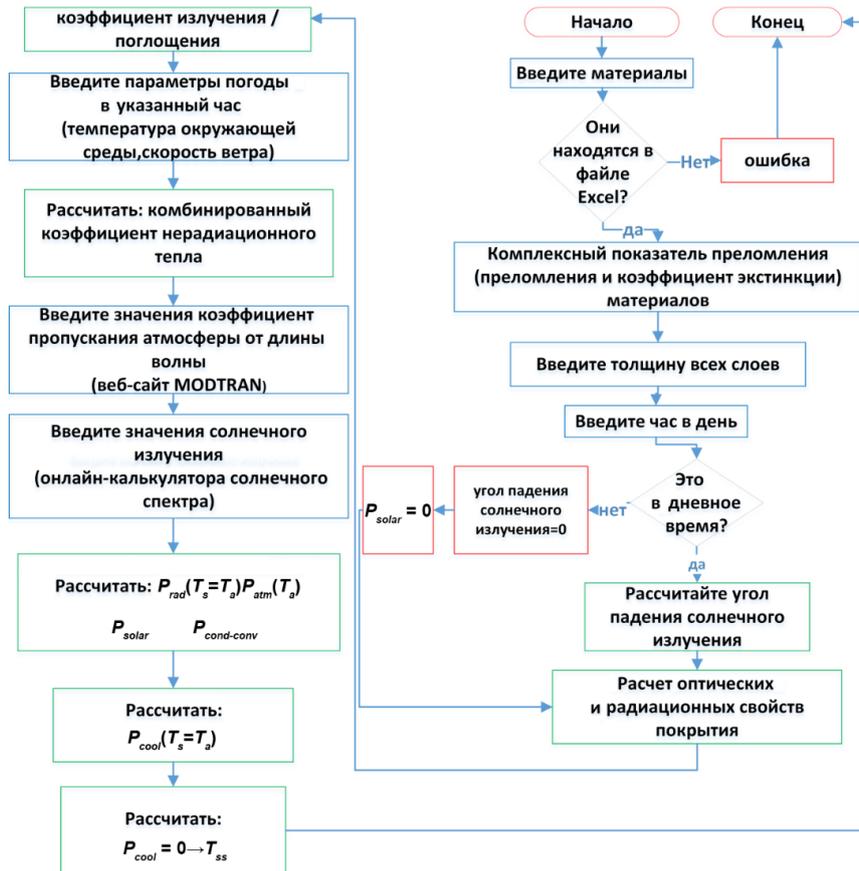


Рис. 2. Блок-схема математической модели
 Fig. 2. Block diagram of the mathematical model

в г. Латакия (Сирия), в соответствии со среднемесячным содержанием газов в атмосфере (табл. 1).

Полученные зависимости коэффициента пропускания атмосферы от длины волны для четырех летних месяцев в Латакии представлены на рис. 1. Представленные данные показывают небольшое отличие значений коэффициента пропускания атмосферы в период с июня по сентябрь. Это объясняется тем, что значения общего количества водяного пара в воздушном столбе и содержания газов в атмосфере в летние месяцы близки. При этом коэффициент пропускания атмосферы в диапазоне длин волн от 8 до 13 мкм в июне (красная линия) выше, чем в остальные месяцы, поскольку июнь характеризуется самым низким содержанием влаги в атмосфере.

Нерадиационный тепловой поток $P_{cond+conv}$ (Вт/м²) учитывается из следующего выражения:

$$P_{cond+conv} = h_c(T_a - T_s), \quad (6)$$

где $h_c = h_{cond} + h_{conv}$ — комбинированный коэффициент нерадиационного тепла, который отражает эффект кондуктивного и конвективного нагрева, возникающий благодаря контакту радиатора с внутренней поверхностью помещения и воздухом (Вт/м²·К).

Влияние скорости ветра на комбинированный коэффициент нерадиационного тепла выражается в форме линейной корреляции [30] следующим уравнением:

$$h_c = 2,8 + 3V, \quad (7)$$

где V — скорость ветра, м/с.

В дневное время радиационный охладитель подвергается воздействию теплового излучения атмосферы и солнечного излучения. В этом случае холодопроизводительность (P_{cool}) можно рассчитать по уравнению [1, 25]:

$$P_{cool}(T_s, T_a) = P_{rad}(T_s) - P_{atm}(T_a) - P_{solar} - P_c. \quad (8)$$

Холодопроизводительность такого радиатора определяется излучаемой мощностью P_{rad} , тепловым излучением, поглощенным атмосферой P_{atm} , мощностью излучения, полученной от солнечного света P_{solar} и тепловыми потерями $P_{cond+conv}$.

Солнечная энергия, поглощаемая структурой P_{solar} (Вт/м²), определяется по формуле:

$$P_{solar} = A \int_0^{\infty} d\lambda \varepsilon_s(\lambda, \theta_{sun}) I_{AM\ 1,5}(\lambda), \quad (9)$$

где $I_{AM\ 1,5}(\lambda)$ — солнечное излучение, Вт/м².

Обычно предполагают, что структура обращена к Солнцу под фиксированным углом θ_{sun} . Таким образом, P_{solar} не имеет углового интеграла, а излучательная способность структуры представлена его значением в θ_{sun} [7, 9].

Значения солнечного излучения для середины каждого летнего месяца в Латакии были получены с помощью онлайн-калькулятора солнечного спектра [31].

Анализ полученных результатов

Объектом исследования была выбрана многослойная структура Рамана, представляющая ин-

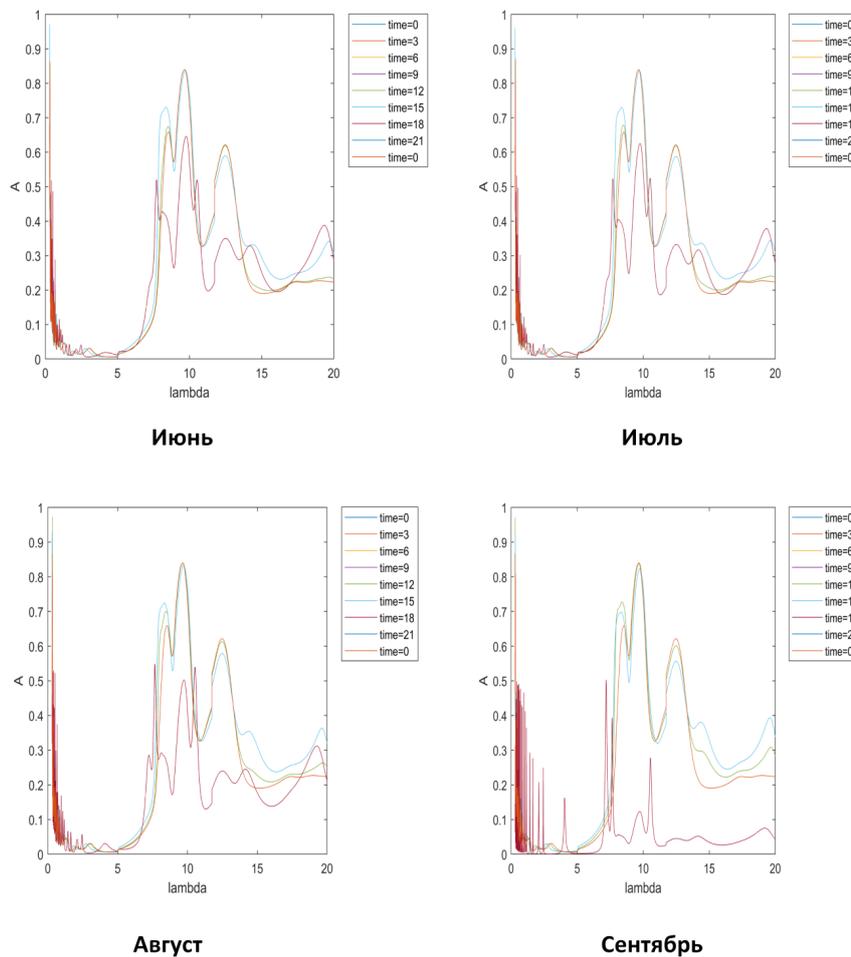


Рис. 3. Коэффициент излучения покрытия в диапазоне от видимого до среднего инфракрасного спектра
 Fig. 3. Emissivity of the coating in the range from visible to mid-infrared spectrum

тегрированный фотонный солнечный отражатель и тепловой излучатель, состоящий из семи слоев диоксида гафния HfO_2 и диоксида кремния SiO_2 , нанесенных на серебряную подложку. Верхние три слоя действуют как излучатель (SiO_2 — 230 нм, HfO_2 — 485 нм, SiO_2 — 688 нм), а нижние слои помогают эффективно отражать солнечное излучение (HfO_2 — 13 нм, SiO_2 — 73 нм, HfO_2 — 34 нм, SiO_2 — 54 нм). Предложенное покрытие обеспечивает холодопроизводительность до 40,1 Вт/м², при солнечном излучении 860 Вт/м² и поддерживает установившуюся температуру в помещении на 4,9 °С ниже температуры воздуха в дневное время в штате Калифорния (США) [7].

Для расчета теоретической холодопроизводительности радиаторов и оценки целесообразности применения радиационного охлаждения в конкретных климатических условиях использовали показатели, предложенные в работе [7]:

- охлаждающая способность, при которой температура поверхности равна температуре окружающей среды;

- установившаяся температура — самая низкая температура, которую может достичь поверхность, соответствующая температуре, при которой мощность охлаждения равна нулю.

Спектральные характеристики и оптические свойства материалов рассчитывались методом перехода-матрица (ТММ) [32–34]. Оптические свойства материалов взяты из работ [35–40]. Холодопроиз-

водительность радиаторов с использованием многослойного покрытия рассчитывалась программой MATLAB.

На рис. 2 представлена блок-схема математической модели расчета теоретической холодопроизводительности и установившейся температуры. Для этого составлена база данных показателей преломления материалов в зависимости от длин волн. Определены толщина каждого слоя покрытия и угол падения солнечного излучения, который меняется в течение дня, а ночью равен нулю. Рассчитаны оптические свойства покрытия, в частности коэффициент излучения, необходимый для расчета энергии радиационного охлаждения. Учтены параметры климатических условий конкретного региона: значения коэффициента пропускания атмосферы (приведены на демо MODTRAN); значения солнечного излучения (получены с помощью онлайн-калькулятора солнечного спектра).

На рис. 3 приведены зависимости коэффициента излучения покрытия в диапазоне от видимого до среднего инфракрасного спектра, рассчитанные для середины каждого летнего месяца по методу ТММ.

Оценка холодопроизводительности радиатора при использовании исследуемого покрытия проводилась по величине чистой охлаждающей способности с учетом изменяющейся температуры поверхности T_s , относительно температуры окружающей среды T_a ; комбинированного коэффициента нерадикационного тепла; температуры окружающей

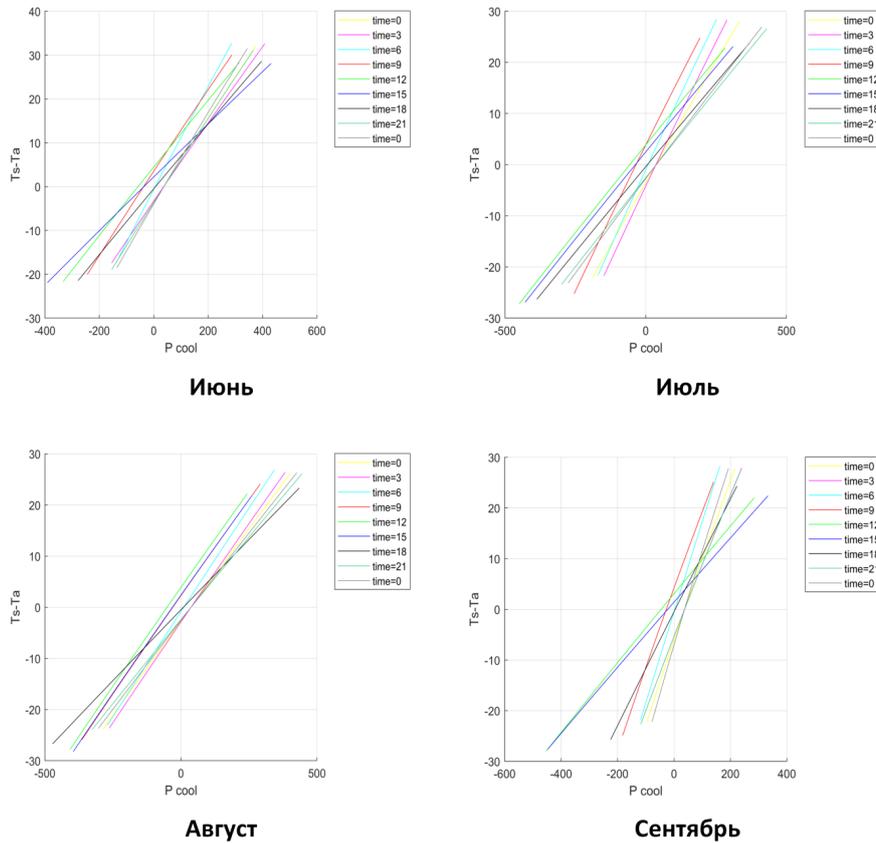


Рис. 4. Охлаждающая способность покрытия с изменяющейся температурой поверхности T_s относительно температуры окружающей среды T_a (Латакия)
 Fig. 4. The cooling power of the coating with varying surface temperature T_s relative to ambient temperature T_a (Latakia)

среды; моделью пропускания атмосферы с изменяющимся общим столбом водяного пара и в соответствии с погодными условиями. Результаты представлены на рис. 4.

Полученные данные показывают, что холодопроизводительность исследованного радиатора высока в начале летних месяцев и уменьшается в сентябре. Это связано как с влиянием общего количества водяных паров в атмосфере, так и с погодными условиями, которые различаются не только в течение месяца, но и в течение суток. Холодопроизводительность увеличивается, когда разница между температурой конструкции и температурой окружающей среды положительна.

Результаты расчета холодопроизводительности радиатора на основе многослойного покрытия (P_{cool}) при температуре поверхности, равной температуре окружающей среды, представлены на рис. 5.

Для оценки охлаждающей способности покрытий учитывается температура, при которой охлаждающая способность равна нулю. Уравнение (9) позволяет определить стационарную температуру T_{ss} . Покрытие с установившейся стационарной температурой ниже температуры окружающей среды должно охлаждать помещение путем теплопроводности.

На рис. 6 показана рассчитанная установившаяся температура в течение выбранных дней исследования. Представленные результаты демонстрируют стабильное снижение температуры в ночное время. Температура поверхности многослойного покры-

тия ниже, чем средняя температура окружающей среды, примерно на 3 градуса. Но в течение дня температура не понижается из-за солнечного излучения, при этом поверхность покрытия нагревается выше температуры окружающей среды примерно на 4 градуса.

Полученные результаты показали, что многослойное покрытие Рамана позволяет достичь максимальную холодопроизводительность (37 Вт/м^2) в ночное время в летние месяцы в климатических условиях г. Латакия (Сирия). В дневное время значительного радиационного охлаждающего эффекта не обнаружено. Однако, не обеспечивая охлаждение помещений в дневное время, покрытие уменьшает количество поглощенной солнечной энергии, что позволяет уменьшить тепловую нагрузку на помещение.

Следует отметить наличие теплового потока, обусловленного теплопроводностью и конвекцией, это указывает на необходимость улучшения теплоизоляции крыши здания.

Выводы

Обзор научной литературы показал, что одним из путей повышения эффективности систем радиационного охлаждения является применение многослойных покрытий. Для систем радиационного охлаждения предложено большое количество новых материалов, однако отсутствие научно обоснованной методики выбора эффективных покрытий для

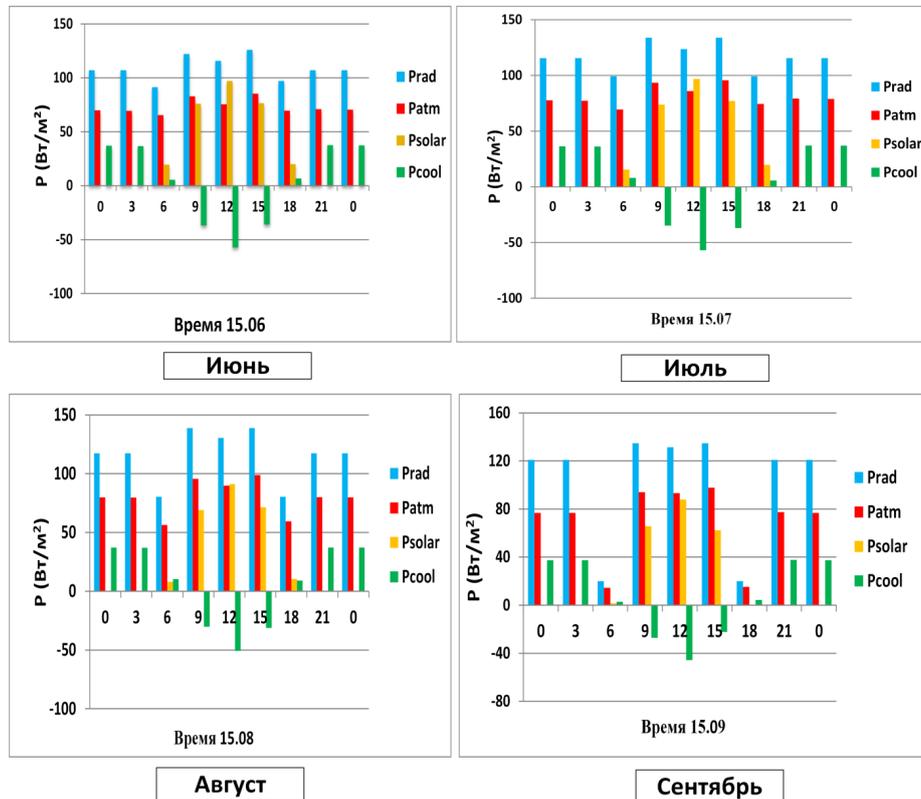


Рис. 5. Охлаждающая мощность покрытия радиатора (P_{cool}) в летние месяцы (Латакия)
Fig. 5. The cooling power of the radiator coating (P_{cool}) in summer months (Latakia)

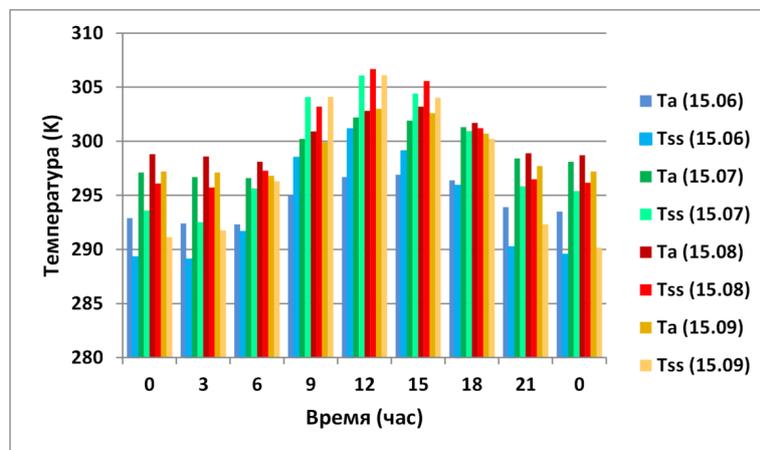


Рис. 6. Оценка эффективности радиационного охлаждения по установившейся температуре (Латакия)
Fig. 6. Evaluation of the efficiency of radiative cooling at the steady-state temperature (Latakia)

определенных климатических условий ограничивает их применение. В работе представлена математическая модель, позволяющая оценить эффективность использования многослойных покрытий для систем радиационного охлаждения в различных климатических условиях. В качестве примера было исследовано многослойное покрытие, предложенное Раманом, в климатических условиях Сирии (г. Латакия). Сирия относится к странам с высоким потенциалом радиационного охлаждения (больше 100 Вт/м²).

Сравнение полученных в результате математического моделирования данных с экспериментальными исследованиями в Калифорнии [7] показали снижение холодопроизводительности радиатора с многослойным покрытием в климатических условиях Сирии. Максимальная холодопроизводительность составила 37 Вт/м² в ночное время в летние месяцы. Это объясняется разницей в количестве водяного пара в столбе воздуха. Так, в летние месяцы в Латакии оно составляет около 3000 атм-см, а в Калифорнии — около 1000 атм-см.

Представленные в работе методики моделирования атмосферного пропускания, расчета солнечного излучения, оценки оптических свойств покрытий позволяют определить эффективное покрытие для систем дневного радиационного охлаждения в любых климатических условиях.

Список источников

1. Дженблат С. С., Волкова О. В. Основы и перспективы применения пассивного радиационного охлаждения // Холодильная техника. 2019. № 9. С. 36–44.
2. Цой А. П., Бараненко А. В., Эглит А. Я. Использование эффективного излучения в холодильной системе открытого ледового катка // Вестник Международной академии холода. 2012. № 4. С. 8–11.
3. Цой А. П., Грановский А. С., Цой Д. А. [и др.]. Влияние климата на работу холодильной системы, использующей эффективное излучение в космическое пространство // Холодильная техника. 2014. № 12. С. 36–41.
4. Цой А. П., Грановский А. С., Бараненко А. В. [и др.]. Расчет величины эффективной холодопроизводительности холодильной системы, использующей охлаждающий эффект небосвода // Вестник Международной академии холода. 2014. № 3. С. 35–40.
5. Цой А. П., Грановский А. С., Бараненко А. В. Моделирование и математическая программа для расчета величины эффективного излучения // Вестник Международной академии холода. 2014. № 1. С. 7–10.
6. Цой А. П., Грановский А. С., Мачуев Ю. И. [и др.]. Обзор проведенных экспериментальных исследований эффективного излучения холодильной системы в космическое пространство // Вестник Международной академии холода. 2015. № 3. С. 28–33.
7. Raman A. P., Anoma M. A., Zhu L. [et al.]. Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight // Nature. 2014. Vol. 515. P. 540–544. DOI: 10.1038/nature13883.
8. Zhai Y., Ma Y., David S. N. [et al.]. Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling // Science. 2017. Vol. 355, Issue 6329. P. 1062–1066. DOI: 10.1126/science.aai7899.
9. Goldstein E. A., Raman A. P., Fan S. Sub-ambient non-evaporative fluid cooling with the sky // Nature Energy. 2017. Vol. 2. 17143. DOI: 10.1038/nenergy.2017.143.
10. Zhao D., Aili A., Yin X. [et al.]. Roof-integrated radiative air-cooling system to achieve cooler attic for building energy saving // Energy and Buildings. 2019. Vol. 203. 109453. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.109453.
11. Mandal J., Fu Y., Overvig A. [et al.]. Hierarchically porous polymer coatings for highly efficient passive daytime radiative cooling // Science. 2018. Vol. 362, Issue 6412. P. 315–319. DOI: 10.1126/science.aat9513.
12. Kou J.-I., Jurado Z., Chen Z. [et al.]. Daytime radiative cooling using near-black infrared emitters // ACS Photonics. 2017. Vol. 4, Issue 3. P. 626–630. DOI: 10.1021/acsp Photonics.6b00991.
13. Wong R. Y. M., Tso C. Y., Chao C. Y. H. [et al.]. Ultra-broadband asymmetric transmission metallic gratings for subtropical passive daytime radiative cooling // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2018. Vol. 186. P. 330–339. DOI: 10.1016/j.solmat.2018.07.002.
14. Liu J., Zhang D., Jiao S. [et al.]. Daytime radiative cooling with clear epoxy resin // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2020. Vol. 207. 110368. DOI: 10.1016/j.solmat.2019.110368.
15. Bao H., Yan Ch., Wang B. [et al.]. Double-layer nanoparticle-based coatings for efficient terrestrial radiative cooling // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2017. Vol. 168. P. 78–84. DOI: 10.1016/j.solmat.2017.04.020.
16. Zhitong Y., Yingyan I., Dikai X. [et al.]. Energy saving analysis of a transparent radiative cooling film for buildings with

roof glazing // Energy and Built Environment. 2021. Vol. 2, Issue 2. P. 214–222. DOI: 10.1016/j.enbenv.2020.07.003.

17. Tso C. Y., Chan K. C., Cha C. Y. H. A field investigation of passive radiative cooling under Hong Kong's climate // Renewable Energy. 2017. Vol. 106. P. 52–61. DOI: 10.1016/j.renene.2017.01.018.

18. Gentle A. R., Smith G. B. A subambient open roof surface under the mid-sunmer sun // Advanced Science. 2015. Vol. 2, Issue 9. 1500119. DOI: 10.1002/advs.201500119.

19. Oliveira J. T., Hagishima A., Tanimoto J. Estimation of passive cooling efficiency for environmental design in Brazil // Energy and Buildings. 2009. Vol. 41, Issue 8. P. 809–813. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.02.006.

20. Laatioui S., Benlattar M., Saadouni M. [et al.]. Zinc monochalcogenide thin films ZnX (X=S, Se, Te) as radiative cooling materials // Optik. 2018. Vol. 166. P. 24–30. DOI: 10.1016/j.ijleo.2018.04.004.

21. Karlessi T., Santamouris M., Apostolakis K. [et al.]. Development and testing of thermochromic coatings for buildings and urban structures // Solar Energy. 2009. Vol. 83, Issue 4. P. 538–551. DOI: 10.1016/j.solener.2008.10.005.

22. Kumar A., Chowdhury A. Reassessment of different antireflection coatings for crystalline silicon solar cell in view of their passive radiative cooling properties // Solar Energy. 2019. Vol. 183. P. 410–418. DOI: 10.1016/j.solener.2019.03.060.

23. Yin X., Yang R., Tan G. [et al.]. Terrestrial radiative cooling: Using the cold universe as a renewable and sustainable energy source // Science. 2020. Vol. 370, Issue 6518. P. 786–791. DOI: 10.1126/science.abb0971.

24. Mandal J., Jia M., Overvig A. [et al.]. Porous Polymers with Switchable Optical Transmittance for Optical and Thermal Regulation // Joule. 2019. Vol. 3, Issue 12. P. 3088–3099. DOI: 10.1016/j.joule.2019.09.016.

25. Li Z., Chen Q., Song Y. [et al.]. Fundamentals, Materials, and Applications for Daytime Radiative Cooling // Advanced Materials Technology. 2020. Vol. 5, Issue 5. 1901007. DOI: 10.1002/admt.201901007.

26. Zeyghami M., Goswami D. Y., Stefanakos E. 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. DOI: 10.1016/j.solmat.2018.01.015.

27. Howell J. R., Pinar Menguc M., Siegel R. Thermal Radiation Heat Transfer. 6th ed. Boca Raton: CRC Press INC, 2015. 1016 p. ISBN 9780429190599.

28. Granqvist C. G., Hjortsberg A. Radiative cooling to low temperatures: general considerations and application to selectively emitting SiO films // Journal of Applied Physics. 1981. Vol. 52, Issue 6. P. 4205–4220. DOI: 10.1063/1.329270.

29. MODTRAN. URL: http://modtran.spectral.com/modtran_home (дата обращения: 01.12.2020).

30. Zhao D., Aili A., Zhai Y. [et al.]. Subambient cooling of water: toward real-world applications of daytime radiative cooling // Joule. 2019. Vol. 3, Issue 1. P. 111–123. DOI: 10.1016/j.joule.2018.10.006.

31. PV Lighthouse — Solar spectrum calculator. URL: <https://www.pvlighthouse.com.au/> (дата обращения: 15.12.2020).

32. Born M., Wolf E. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light. 6th ed. Pergamon, 1980. 836 p. ISBN 9781483103204.

33. Yeh P. Optical waves in layered media. Hoboken: Wiley, 2005. 416 p. ISBN 978-0-471-73192-4.

34. Mackay T. G., Lakhtakia A. The Transfer-Matrix Method in electromagnetics and optics. San Rafael: Morgan & Claypool Publ., 2020. 126 p. ISBN 9781681737928; 9781681737935; 9781681737942.

35. Werner W. S. M., Glantschnig K., Ambrosch-Draxl C. Optical constants and inelastic electron-scattering data for 17 elemental metals // Journal of Physical and Chemical Reference Data. 2009. Vol. 38, Issue 4. P. 1013–1092. DOI: 10.1063/1.3243762.

36. Gao L., Lemarchand F., Lequime M. Exploitation of multiple incidences spectrometric measurements for thin film reverse engineering // *Opt. Express*. 2012. Vol. 20, Issue 14. P. 15734–15751. DOI: 10.1364/OE.20.015734.

37. Yang H. U., D'Archangel J., Sundheimer M. L. [et al.]. Optical dielectric function of silver // *Physical Review B*. 2015. Vol. 91, Issue 23. 235137. DOI: 10.1103/PhysRevB.91.235137.

38. Rodríguez-de Marcos L. V., Larruquert J. I., Méndez J. A. [et al.]. Self-consistent optical constants of SiO₂ and Ta₂O₅ films // *Optical Materials Express*. 2016. Vol. 6, Issue 11. P. 3622–3637. DOI: 10.1364/OME.6.003622.

39. Kischkat J., Peters S., Gruska B. [et al.]. Mid-infrared optical properties of thin films of aluminum oxide, titanium dioxide, silicon dioxide, aluminum nitride, and silicon nitride // *Applied Optics*. 2012. Vol. 51, Issue 28. P. 6789–6798. DOI: 10.1364/AO.51.006789.

40. Bright T. J., Watjen J. I., Zhang Z. M. [et al.]. Optical properties of HfO₂ thin films deposited by magnetron sputtering: from the visible to the far-infrared // *Thin Solid Films*. 2012. Vol. 520, Issue 22. P. 6793–6802. DOI: 10.1016/j.tsf.2012.07.037.

ДЖЕНБЛАТ Силвана Сухейль, аспирант факультета энергетики и экотехнологий.

Адрес для переписки: Silvana.jenblat@gmail.com

ВОЛКОВА Ольга Владимировна, доктор технических наук, доцент (Россия), доцент научно-образовательного центра химического инжиниринга и биотехнологий.

SPIN-код: 5907-6984; AuthorID (РИНЦ): 689163

AuthorID (SCOPUS): 56900839600

Адрес для переписки: v-olga.v@mail.ru

Для цитирования

Дженблат С. С., Волкова О. В. Оценка эффективности многослойного покрытия для пассивного радиационного охлаждения // *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2021. Т. 5, № 2. С. 37–46. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-2-37-46.

Статья поступила в редакцию 18.03.2021 г.

© С. С. Дженблат, О. В. Волкова

ESTIMATION OF MULTI-LAYER COATING EFFICIENCY FOR PASSIVE RADIATIVE COOLING

S. S. Jenblat, O. V. Volkova

ITMO University,
Russia, Saint Petersburg, Kronverksky Ave., 49, 197101

Passive radiative cooling is a promising direction in energy conservation and environmental protection. One of the ways to increase the efficiency of radiative cooling systems is the use of multi-layer coatings. In recent years, several novel materials with high emissivity have been proposed, which allow the creation of radiators that provide an average daily cooling power of approximately 100 W/m² during daytime. Based on the developed mathematical model, the optical properties of the multi-layer coating for the radiative cooling system were evaluated by the Transfer Matrix Method and the effectiveness of radiative cooling was determined due to the use of the multi-layer coating in the climatic conditions of Syria (Latakia). The results of modeling the atmospheric transmittance in the summer months in Syria (Latakia) are presented. The developed mathematical model, methods for modeling atmospheric transmittance, calculating solar radiation, and evaluating the optical properties of multi-layer coating, allow determining an effective multi-layer coating for radiative cooling systems in any climatic conditions.

Keywords: passive radiative cooling, multi-layer coating, atmospheric transmittance, Transfer Matrix Method, Syria (Latakia).

References

1. Jenblat S. S., Volkova O. V. Osnovy i perspektivy primeneniya passivnogo radiatsionnogo okhlazhdeniya [Fundamentals and prospects for the use of passive radiation cooling] // Kholodil'naya tekhnika. *Kholodil'naya Tekhnika*. 2019. No. 9. P. 36–44. (In Russ.).
2. Tsoy A. P., Baranenko A. V., Eglit A. Ya. Ispol'zovaniye effektivnogo izlucheniya v kholodil'noy sisteme otkrytogo ledovogo katka [The use of effective radiation in the refrigeration system of an open ice skating rink] // Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2012. No. 4. P. 8–11. (In Russ.).
3. Tsoy A. P., Granovsky A. S., Tsoy D. A. [et al.]. Vliyaniye klimata na rabotu kholodil'noy sistemy, ispol'zuyushchey effektivnoye izlucheniye v kosmicheskoye prostranstvo [Influence of climate on the operation of a refrigeration system using effective radiation into outer space] // Kholodil'naya tekhnika. *Kholodil'naya Tekhnika*. 2014. No. 12. P. 36–41. (In Russ.).
4. Tsoy A. P., Granovsky A. S., Baranenko A. V. [et al.]. Raschet velichiny effektivnoy kholodoproizvoditel'nosti kholodil'noy sistemy, ispol'zuyushchey okhlazhdayushchiy effekt nebo-svoda [Calculation of effective refrigeration capacity for refrigeration system using night sky radiant cooling] // Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2014. No. 3. P. 35–40. (In Russ.).
5. Tsoy A. P., Granovsky A. S., Baranenko A. V. Modelirovaniye i matematicheskaya programma dlya rascheta velichiny effektivnogo izlucheniya [Simulation and a mathematical program for calculating the value of effective radiation] // Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2014. No. 1. P. 7–10. (In Russ.).
6. Tsoy A. P., Granovskiy A. S., Machuev Yu. I. [et al.]. Obzor provedennykh eksperimental'nykh issledovaniy effektivnogo izlucheniya kholodil'noy sistemy v kosmicheskoye prostranstvo [Experimental research of refrigerating system effective radiation into space] // Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2015. No. 3. P. 28–33. (In Russ.).
7. Raman A. P., Anoma M. A., Zhu L. [et al.]. Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight // *Nature*. 2014. Vol. 515. P. 540–544. DOI: 10.1038/nature13883. (In Engl.).
8. Zhai Y., Ma Y., David S. N. [et al.]. Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling // *Science*. 2017. Vol. 355, Issue 6329. P. 1062–1066. DOI: 10.1126/science.aai7899. (In Engl.).
9. Goldstein E. A., Raman A. P., Fan S. Sub-ambient non-evaporative fluid cooling with the sky // *Nature Energy*. 2017. Vol. 2. 17143. DOI: 10.1038/nenergy.2017.143. (In Engl.).
10. Zhao D., Aili A., Yin X. [et al.]. Roof-integrated radiative air-cooling system to achieve cooler attic for building energy saving // *Energy and Buildings*. 2019. Vol. 203. 109453. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.109453. (In Engl.).
11. Mandal J., Fu Y., Overvig A. [et al.]. Hierarchically porous polymer coatings for highly efficient passive daytime radiative cooling // *Science*. 2018. Vol. 362, Issue 6412. P. 315–319. DOI: 10.1126/science.aat9513. (In Engl.).
12. Kou J.-I., Jurado Z., Chen Z. [et al.]. Daytime radiative cooling using near-black infrared emitters // *ACS Photonics*. 2017. Vol. 4, Issue 3. P. 626–630. DOI: 10.1021/acsp Photonics.6b00991. (In Engl.).
13. Wong R. Y. M., Tso C. Y., Chao C. Y. H. [et al.]. Ultra-broadband asymmetric transmission metallic gratings for subtropical passive daytime radiative cooling // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2018. Vol. 186. P. 330–339. DOI: 10.1016/j.solmat.2018.07.002. (In Engl.).
14. Liu J., Zhang D., Jiao S. [et al.]. Daytime radiative cooling with clear epoxy resin // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2020. Vol. 207. 110368. DOI: 10.1016/j.solmat.2019.110368. (In Engl.).
15. Bao H., Yan Ch., Wang B. [et al.]. Double-layer nanoparticle-based coatings for efficient terrestrial radiative cooling // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2017. Vol. 168. P. 78–84. DOI: 10.1016/j.solmat.2017.04.020. (In Engl.).
16. Zhitong Y., Yingyan I., Dikai X. [et al.]. Energy saving analysis of a transparent radiative cooling film for buildings with roof glazing // *Energy and Built Environment*. 2021. Vol. 2, Issue 2. P. 214–222. DOI: 10.1016/j.enbenv.2020.07.003. (In Engl.).

17. Tso C. Y., Chan K. C., Cha C. Y. H. A field investigation of passive radiative cooling under Hong Kong's climate // *Renewable Energy*. 2017. Vol. 106. P. 52–61. DOI: 10.1016/j.renene.2017.01.018. (In Engl.).
18. Gentle A. R., Smith G. B. A subambient open roof surface under the mid-summer sun // *Advanced Science*. 2015. Vol. 2, Issue 9. 1500119. DOI: 10.1002/advs.201500119. (In Engl.).
19. Oliveira J. T., Hagishima A., Tanimoto J. Estimation of passive cooling efficiency for environmental design in Brazil // *Energy and Buildings*. 2009. Vol. 41, Issue 8. P. 809–813. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.02.006. (In Engl.).
20. Laatioui S., Benlattar M., Saadouni M. [et al.]. Zinc monochalcogenide thin films ZnX (X=S, Se, Te) as radiative cooling materials // *Optik*. 2018. Vol. 166. P.24–30. DOI: 10.1016/j.ijleo.2018.04.004. (In Engl.).
21. Karlessi T., Santamouris M., Apostolakis K. [et al.]. Development and testing of thermochromic coatings for buildings and urban structures // *Solar Energy*. 2009. Vol. 83, Issue 4. P. 538–551. DOI: 10.1016/j.solener.2008.10.005. (In Engl.).
22. Kumar A., Chowdhury A. Reassessment of different antireflection coatings for crystalline silicon solar cell in view of their passive radiative cooling properties // *Solar Energy*. 2019. Vol. 183. P. 410–418. DOI: 10.1016/j.solener.2019.03.060. (In Engl.).
23. Yin X., Yang R., Tan G. [et al.]. Terrestrial radiative cooling: Using the cold universe as a renewable and sustainable energy source // *Science*. 2020. Vol. 370, Issue 6518. P. 786–791. DOI: 10.1126/science.abb0971. (In Engl.).
24. Mandal J., Jia M., Overvig A. [et al.]. Porous Polymers with Switchable Optical Transmittance for Optical and Thermal Regulation // *Joule*. 2019. Vol. 3, Issue 12. P. 3088–3099. DOI: 10.1016/j.joule.2019.09.016. (In Engl.).
25. Li Z., Chen Q., Song Y. [et al.]. Fundamentals, Materials, and Applications for Daytime Radiative Cooling // *Advanced Materials Technology*. 2020. Vol. 5, Issue 5. 1901007. DOI: 10.1002/admt.201901007. (In Engl.).
26. Zeyghami M., Goswami D. Y., Stefanakos E. 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. DOI: 10.1016/j.solmat.2018.01.015. (In Engl.).
27. Howell J. R., Pinar Menguc M., Siegel R. *Thermal Radiation Heat Transfer*. 6th ed. Boca Raton: CRC Press INC, 2015. 1016 p. ISBN 9780429190599. (In Engl.).
28. Granqvist C. G., Hjortsberg A. Radiative cooling to low temperatures: general considerations and application to selectively emitting SiO films // *Journal of Applied Physics*. 1981. Vol. 52, Issue 6. P. 4205–4220. DOI: 10.1063/1.329270. (In Engl.).
29. MODTRAN. URL: http://modtran.spectral.com/modtran_home (accessed: 01.12.2020). (In Engl.).
30. Zhao D., Aili A., Zhai Y. [et al.]. Subambient cooling of water: toward real-world applications of daytime radiative cooling // *Joule*. 2019. Vol. 3, Issue 1. P. 111–123. DOI: 10.1016/j.joule.2018.10.006. (In Engl.).
31. PV Lighthouse — Solar spectrum calculator. URL: <https://www.pvlighthouse.com.au/> (accessed: 15.12.2020) (In Engl.).
32. Born M., Wolf E. *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. 6th ed. Pergamon, 1980. 836 p. ISBN 9781483103204. (In Engl.).
33. Yeh P. *Optical waves in layered media*. Hoboken: Wiley, 2005. 416 p. ISBN 978-0-471-73192-4. (In Engl.).
34. Mackay T. G., Lakhtakia A. *The Transfer-Matrix Method in electromagnetics and optics*. San Rafael: Morgan & Claypool Publ., 2020. 126 p. ISBN 9781681737928; 9781681737935; 9781681737942. (In Engl.).
35. Werner W. S. M., Glantschnig K., Ambrosch-Draxl C. Optical constants and inelastic electron-scattering data for 17 elemental metals // *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. 2009. Vol. 38, Issue 4. P. 1013–1092. DOI: 10.1063/1.3243762. (In Engl.).
36. Gao L., Lemarchand F., Lequime M. Exploitation of multiple incidences spectrometric measurements for thin film reverse engineering // *Opt. Express*. 2012. Vol. 20, Issue 14. P. 15734–15751. DOI: 10.1364/OE.20.015734. (In Engl.).
37. Yang H. U., D'Archangel J., Sundheimer M. L. [et al.]. Optical dielectric function of silver // *Physical Review B*. 2015. Vol. 91, Issue 23. 235137. DOI: 10.1103/PhysRevB.91.235137. (In Engl.).
38. Rodriguez-de Marcos L. V., Larruquert J. I., Méndez J. A. [et al.]. Self-consistent optical constants of SiO₂ and Ta₂O₃ films // *Optical Materials Express*. 2016. Vol. 6, Issue 11. P. 3622–3637. DOI: 10.1364/OME.6.003622. (In Engl.).
39. Kischkat J., Peters S., Gruska B. [et al.]. Mid-infrared optical properties of thin films of aluminum oxide, titanium dioxide, silicon dioxide, aluminum nitride, and silicon nitride // *Applied Optics*. 2012. Vol. 51, Issue 28. P. 6789–6798. DOI: 10.1364/AO.51.006789. (In Engl.).
40. Bright T. J., Watjen J. I., Zhang Z. M. [et al.]. Optical properties of HfO₂ thin films deposited by magnetron sputtering: from the visible to the far-infrared // *Thin Solid Films*. 2012. Vol. 520, Issue 22. P. 6793–6802. DOI: 10.1016/j.tsf.2012.07.037. (In Engl.).

JENBLAT Silvana Suheil, Graduate Student, Energy and Ecotechnology Faculty.

Correspondence address: Silvana.jenblat@gmail.com

VOLKOVA Olga Vladimirovna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Research and Educational Center of Chemical Engineering and Biotechnology.

SPIN-code: 5907-6984

AuthorID (RSCI): 689163

AuthorID (SCOPUS): 56900839600

Correspondence address: v-olga.v@mail.ru

For citations

Jenblat S. S., Volkova O. V. Estimation of multi-layer coating efficiency for passive radiative cooling // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2021. Vol. 5, no. 2. P. 37–46. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-2-37-46.

Received March 18, 2021.

© S. S. Jenblat, O. V. Volkova