

УДК 620.92

Спектрометрический анализ покрытия на основе диоксида титана для применения в комбинированном солнечном коллекторе

В. М. ШЕИН^{1*}, канд. техн. наук А. А. НИКИТИН¹,
канд. техн. наук В. А. КОРАБЛЕВ¹, д-р техн. наук А. Б. СУЛИН¹,
канд. техн. наук В. Е. КРИВОШЕЕВ²

¹Университет ИТМО

²Самарский государственный технический университет

*E-mail: shein512.54@gmail.com

На сегодняшний день одним из интенсивно развивающихся направлений исследований в области возобновляемых источников энергии является разработка теплообменных аппаратов (солнечных коллекторов) комбинированного типа действия. Но, как показывают исследования, основным фактором для обеспечения максимальной эффективности работы подобных агрегатов, как в ночном, так и в дневном режимах работы, является применяемое в коллекторах селективные покрытия. Основная цель данной работы: проведение спектрометрического исследования поглощательной/излучательной способности в ИК диапазоне длин волн разработанного селективного покрытия на основе диоксида титана при помощи ИК-спектрометра Фурье. Особый интерес представляет диапазон длин волн, которому соответствует так называемое «окно прозрачности атмосферы» — атмосферное окно (8–13 мкм), поскольку именно по излучательной способности пластины абсорбера с нанесенным покрытием в данном диапазоне можно оценить эффективность работы комбинированного коллектора в ночном режиме работы. Проведенные экспериментальные исследования позволили определить оптимальное количество слоев и концентрацию суспензии TiO_2 для нанесения на теплообменный аппарат. Так же была подтверждена эффективность поглощения/излучения разработанного покрытия в диапазонах длин волн, соответствующих ИК диапазону. Полученные результаты станут основой для проведения натурных экспериментов по оценке эффективности работы опытного образца комбинированного коллектора дневного и ночного действия.

Ключевые слова: спектрометрия, степень черноты, НПВО, тепловой поток, атмосферное окно, ИК спектр, возобновляемые источники энергии.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 26.09.2024, одобрена после рецензирования 25.10.2024, принята к печати 30.10.2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-4-39-45

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Шейн В. М., Никитин А. А., Кораблев В. А., Сулин А. Б., Кривошеев В. Е. Спектрометрический анализ покрытия на основе диоксида титана для применения в комбинированном солнечном коллекторе. // Вестник Международной академии холода. 2024. № 4. С. 39–45. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-4-39-45

Spectrometric analysis of titanium dioxide-based coating to be applied to a combined solar collector

V. M. SHEIN^{1*}, Ph. D. A. A. NIKITIN¹,

Ph. D. V. A. KORABLEV¹, D. Sc. A. B. SULIN¹,

Ph. D. V. E. KRIVOSHEEV²

¹ITMO University

²Samara State Technical University

*E-mail: shein512.54@gmail.com

Currently, one of the rapidly developing areas of research in the field of renewable energy sources is the development of heat exchangers (solar collectors) of combined type of action. However, as research show, the main factor to ensure maximum efficiency of such units, both in the night and day modes of operation, is the selective coatings used in the collectors. The main objective of this work is to perform a spectrometric study of the absorption/emissivity in the IR wavelength range of the developed titanium dioxide-based selective coating using a Fourier infrared spectrometer. Of particular interest is the range of wavelengths to which the so-called 'window of atmospheric transparency' — atmospheric window

(8–13 microns) corresponds, as it is the emissivity of the absorber plate with the applied coating in this range that can be used to evaluate the efficiency of the combined collector in the night mode of operation. The conducted experimental studies allowed to determine the optimal number of layers and concentration of TiO₂ suspension to be applied to the heat exchanger. The absorption/radiation efficiency of the developed coating in the wavelength ranges corresponding to the IR range was also confirmed. The results obtained may serve as a basis for conducting field experiments to assess the efficiency of the prototype for the combined day-night collector.

Keywords: spectrometry, degree of blackness, ATR, heat flux, atmospheric window, IR spectrum, renewable energy sources.

Article info:

Received 26/09/2024, approved after reviewing 25/10/2024, accepted 30/10/2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-4-39-45

Article in Russian

For citation:

Shein V. M., Nikitin A. A., Korablev V. A., Sulin A. B., Krivosheev V. E. Spectrometric analysis of titanium dioxide-based coating to be applied to a combined solar collector. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2024. No 4. p. 39-45

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-4-39-45

Введение

Одним из наиболее актуальных направлений исследования в современной энергетике на сегодняшний день, является проектирование высокоэффективных теплообменных аппаратов на базе возобновляемых источников энергии — солнечных коллекторов [1, 2]. Данная задача является сложной и многостадийной, поскольку от правильности принятых технических решений зависит эффективность работы агрегата, и его конечная стоимость для потребителя.

Солнечный коллектор — теплообменный аппарат, служащий для сбора падающего на него солнечного излучения и последующего преобразования в тепловую энергию теплоносителя (воздуха, воды и т. д.) [3, 4]. Известно много типов солнечных коллекторов, но наиболее часто используются вакуумные и плоские. Вакуумные солнечные коллекторы представляют собой устройство основным элементом конструкции которого являются стеклянные трубки с вакуумом внутри для предотвращения тепловых потерь [5]. В каждой из трубок установлен канал, изготавливаемый как правило из меди, по которому протекает и нагревается теплоноситель. В свою очередь плоские солнечные коллектора представляют собой конструкцию, состоящую из листа металла (с нанесенным на его поверхность селективным покрытием), трубопровода, собранного в коллектор, к которому приваривается абсорбирующая поверхность, и защитного экрана, как правило из одного или двух слоев закаленного стекла, поликарбоната, или полиэтилена [6]. В данном типе коллекторов особый интерес представляет селективное покрытие пластины коллекторов, поскольку это один из факторов, оказывающих максимальное влияние на энергетическую эффективность работы установки для преобразования энергии.

Аналитические исследования селективных покрытий и планирование эксперимента

В российских и зарубежных научных трудах большое количество исследований посвящено анализу эффективности покрытий, методике их нанесения на поверхность, компонентному составу покрытий.

В научном труде [7] авторами исследуется ТРЕТ покрытие на основе композитного материала (титана с по-

лиэтилентерефталатом) толщиной 200 мкм, численное моделирование показало следующие оптические характеристики: степень поглощения в дневном режиме работы — 0,92; степень излучения в ночном режиме работы — 0,8.

Научный коллектив под руководством Dengwu Liu в своем исследовании предложили использовать в качестве селективного покрытия для коллекторов двойного и ночного типа действия покрытие на основе наночастиц кремния с анодированным оксидом алюминия (АОА). Данное покрытие наносилось на поверхность пластины абсорбера методом отжига при температуре 600 °С. При это авторами было отмечено, что несмотря на высокую температуру отжига, покрытие не теряет своих оптических свойств. Экспериментальные исследования и спектрометрический анализ показали следующие оптические характеристики: в дневном режиме (поглощение) — 0,84; в ночном режиме (излучение) — 0,7 [8].

Группа ученых из Калифорнийского института в Беркли исследуя процессы радиационного охлаждения и нагрева предложили использовать в качестве селективного покрытия наночастицы кремния, наносимые методом легирования на металлическую подложку. Проведенные исследования позволили определить прямую зависимость размера наночастицы и спектральных характеристик покрытия. Спектроскопические исследования показали изменение излучательной/поглощательной способности в ИК спектре от 0,74 до 0,8.

Так же исследованиям селективных покрытий были посвящены работы: Elvire Katramiz (покрытие: Al/SiO₂/TiO₂) [10], В. Zhao (покрытие: SiO₂/Ag) [11], Cai L, Song AY, Li W (покрытие: ZnO) [12] и т. д.

Рассмотрим график распределения идеальных и реальных спектральных свойств комбинированного коллектора в инфракрасном диапазоне спектра (рис. 1) [14].

Таким образом комбинированные солнечные коллекторы должны удовлетворять следующим условиям.

1. Селективные покрытие пластин коллекторов должны обладать высокой спектральной поглощательной способностью в диапазоне длин волн от 0,2–3 мкм, и высокой излучательной способностью в диапазоне 8–13 мкм (окно прозрачности атмосферы).

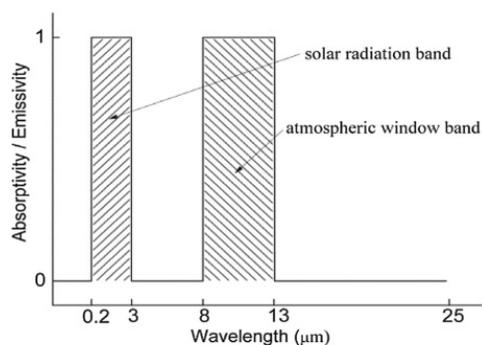


Рис. 1. Распределение идеальных и реальных спектральных свойств комбинированного коллектора

Fig. 1. Distribution of ideal and real spectral properties of the combined collector

Данное условие обеспечивает высокую эффективность работы солнечного коллектора в режиме нагрева в дневное время суток и позволяет эффективно отводить теплоту в космическое пространство в ночном режиме работы.

2. Селективные покрытия пластин коллекторов должны обладать низкой спектральной поглощательной и излучательной способностями в остальном спектральном диапазоне.

Данное условие обусловлено снижением радиационных тепловых потерь в дневном и ночном режиме работы.

Исходя из проведенного аналитического исследования селективных покрытий было установлено, что применяемые на сегодняшний день селективные покрытия являются многокомпонентными и сложными в изготовлении и нанесении на поверхность коллекторов. Но общим для всех типов покрытий является методика исследования и проверка их работоспособности — спектроскопия [15]. Спектроскопический анализ проводится в диапазонах длин волн, соответствующих инфракрасной области спектра [16].

Основная цель данной работы — провести спектрометрическое исследование поглощательной/излучательной способности в ИК диапазоне длин волн разработанного селективного покрытия на основе диоксида титана на ИК-спектрометре Фурье для определения спектральной степени черноты покрытия, определения эффективной длины волны, подтверждения радиационных характеристик в окне прозрачности атмосферы, подтверждение результатов предварительных испытания по определению концентрации и количества слоев раствора наносимого на поверхность коллектора.

В рамках проведения экспериментальных исследований методом спектрометрии были поставлены следующие задачи:

- исследовать спектральные радиационные свойства селективного покрытия на основе диоксида титана;
- исследовать зависимость количества слоев нанесенного покрытия на эффективность работы покрытия в спектре;
- определить спектральную степень эмиссии покрытия, и эффективную длину волны;

Таблица 1
Соотношение концентраций TiO₂ (на 100 мл раствора)

Table 1
Ratio of TiO₂ concentrations (per 100 ml of solution)

Значение концентрации TiO ₂ , %	Количество TiO ₂ , г
7,5	7,5 г на 100 мл раствора

— получить спектральное распределение интенсивности излучения/поглощения в диапазоне длин волн, соответствующих инфракрасному диапазону.

Для проведения экспериментального исследования будет применено следующее оборудование и составляющие:

1. Раствор суспензии диоксида титана с концентрацией в соответствии с данными табл. 1.

В работе [17], в результате предварительных экспериментальных исследований было определено оптимальное количество слоев покрытия наносимого на поверхность коллектора, и концентрация активного вещества (TiO₂) в суспензии. Выбранные значения были определены исходя из полученных значений температуры, поверхности комбинированного коллектора дневном и ночном режиме работы.

2. ИК спектрометр Фурье с германиевым кристаллом (рис. 2).



Рис. 2. IR spectrometer TENSOR 37 (Ge — кристалл)

Fig. 2. IR spectrometer TENSOR 37 (Ge — crystal)

3. Медные заготовки площадью 1 × 1 см² (рис. 3).

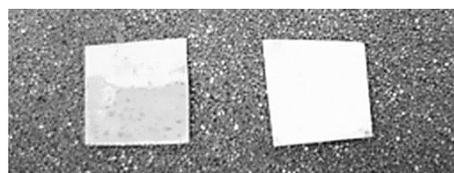


Рис. 3. Медные заготовки имитирующие поверхность комбинированного коллектора (слева без покрытия, справа с нанесенным покрытием)

Fig. 3. Copper blanks simulating the surface of the combined collector (left — uncoated, right — coated one)

Спектрометрический анализ селективного покрытия

Для проведения исследования выполним калибровку спектрометра и проведем тестовые измерения, чистой медной заготовки (без нанесения на нее суспензия диоксида титана). Отметим, что диапазон исследования спектра в данной модификации спектрометра ограничен шумами, возникающими при значениях длины волны (менее 2 мкм и более 18 мкм). Поэтому была выполнена соответствующая настройка и измерения проводились в инфракрасном диапазоне от 2 до 18 мкм.

Приготовленная суспензия диоксида титана наносится, на медную заготовку, толщиной одного слоя 10 мкм. Слои наносятся до тех пор, пока спектральные свойства поверхности не будут отличаться или будут отличаться незначительно (не более чем на 5 %). Контроль толщины нанесенного покрытия осуществляется ИК-спектрометром TENSOR 37.

В используемом ИК-спектрометре предусмотрено программное обеспечение ПО OPUS предназначенное для настройки параметров измерения, обработки входной и выходной информации и графического представления результатов измерения. На графиках с результатами спектрометрических измерений цветом отмечены области: светло-серым 0,3–3 мкм (область солнечного излучения), серым 8–13 мкм (атмосферное окно);

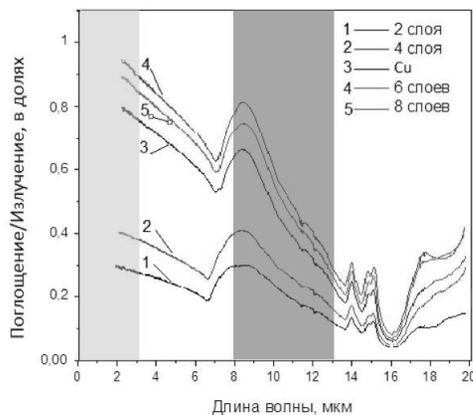


Рис. 4. Результаты спектрометрического анализа суспензии TiO₂, нанесенного на медные заготовки, в зависимости от количества слоев

Fig. 4. Results of spectrometric analysis of TiO₂ suspension applied to copper billets, depending on the number of layers

Результаты измерения представлены на рис. 4.

Анализируя полученный график значений спектральных свойств поглощения/излучения, можно сделать вывод об эффективном количестве слоев селективного покрытия, которое должно быть нанесено на поверхность теплового коллектора комбинированного типа действия.

Максимально эффективное число слоев покрытия — 6, концентрация TiO₂ — 7,5 г на 100 мл раствора.

Для наглядности характеристик селективного покрытия (с 6 нанесенными слоями на поверхность коллектора комбинированного типа действия), полученных после спектрометрического анализа сведем в табл. 2.

Так же из графика рис. 4 и табл. 2 видно, что оба условия, предъявляемые к коллекторам с точки зрения спектральных свойств, удовлетворяются во всех диапазонах ИК спектра. Следовательно, так же можно сделать вывод о том, что разработанное покрытие действительно может эффективно работать в комбинированном режиме работы. Помимо этого, согласно теории радиационного теплообмена полученные значения излучательной способности являются тождественными спектральной степени черноты суспензии диоксида титана. Высокое значение спектральной степени черноты покрытия объясняется высокой пористостью суспензии, нанесенной на покрытие (более 50 %), что в свою очередь приближает поверхность к модели абсолютно черного тела, за счет отражения излучения внутри поры.

Нарушенное полное внутреннее отражение (НПВО)

Для дальнейшей работы по исследованию количества отраженного радиационного потока введем понятие нарушенного полного внутреннего отражения (далее НПВО). Методика НПВО основывается на оптических закономерностях, которые возникают при эффекте отражения падающего света на границу раздела двух сред, имеющих разную оптическую плотность [18]-[20]. Графически НПВО представлено на рис. 5.

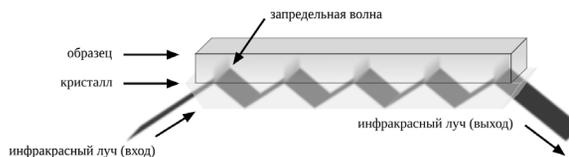


Рис. 5. Нарушенное полное внутренне отражение (НПВО)
Fig. 5. Disturbed total internal reflection (ATR)

Таблица 2

Спектральные характеристики (поглощение/излучение) покрытия — суспензия диоксида титана (TiO₂) в сравнении с оксидом меди Cu₂O

Table 2

Spectral characteristics (absorption/emission) of coating — titanium dioxide (TiO₂) suspension versus Cu₂O copper oxide

λ, мкм	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
TiO ₂	0,94	0,94	0,87	0,81	0,77	0,72	0,76	0,83	0,79	0,69
Cu ₂ O	0,71	0,69	0,65	0,62	0,59	0,55	0,57	0,65	0,5	0,43
λ, мкм	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
TiO ₂	0,57	0,5	0,4	0,31	0,34	0,32	0,15	0,2	0,42	
Cu ₂ O	0,38	0,35	0,29	0,2	0,24	0,2	0,21	0,18	0,24	

Свет проходит через кристалл, который имеет высокое значение преломления, попадает на границу раздела сред между кристаллом и образцом, обладающим значительно меньшим значением коэффициента преломления, при этом имея угол падения, превосходящий предельный угол полного отражения. Далее луч отражается от границы раздела двух сред практически в полном объеме, но при этом часть падающего излучения способна проникнуть в граничащую с кристаллом область на небольшую глубину. Значение глубины, на которую проходит световой луч, является функцией длины волны и зависит от значений коэффициента преломления, материала вещества и величины угла падения. Исходя из того, как образец поглощает или не поглощает падающий на него энергетический поток, меняется интенсивность отраженного света в большую или меньшую сторону. Как следствие этого явления, на выходе получается спектр отражения, который подобен спектру пропускания.

Проведенный спектрометрический анализ отражения методом НПВО показал следующие результаты рис. 6.

Полученные по результатам измерений значения НПВО, представленные на рис. 6, сведены в табл. 3.

Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод о том, несмотря на то что наименьшая отражательная способность была зафиксирована при нанесении 2 слоев суспензии диоксида титана на поверхность

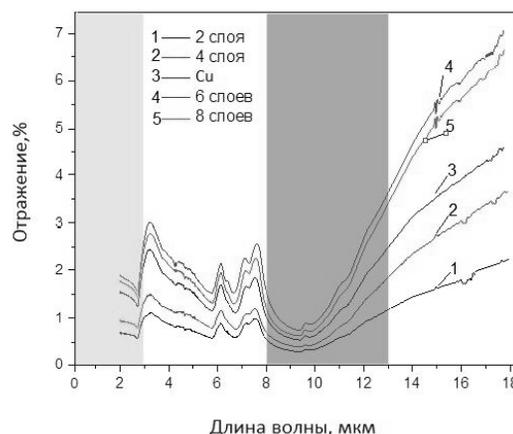


Рис. 6. НПВО суспензии TiO₂, нанесенного на медную пластину и окисленной медной пластины в зависимости от количества слоев

Fig. 6. NPVO of TiO₂ suspension deposited on copper plate and oxidized copper plate as a function of the number of layers

коллектора, окончательно принимается 6 слоев нанесенного покрытия. Поскольку измеренные значения отражательной способности между 2 и 6 слоями диоксида титана отличаются на 2,7%, а в рабочих диапазонах ИК спектра (0,3–3 мкм и 8–13 мкм) количество слоев 2 не удовлетворяет исходным условиям.

Таблица 3

Спектральные характеристики НПВО покрытия — суспензия TiO₂ в сравнении с оксидом меди Cu₂O

Table 3

Spectral characteristics of NPVO coating — TiO₂ suspension in comparison with Cu₂O copper oxide

λ, мкм	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
TiO ₂	1,7	2,7	2,3	1,7	2,3	1,9	1,5	0,8	0,9	1,2
Cu ₂ O	1,5	1,4	1,8	1,5	1,7	2	1,3	1,8	1,9	1,9
λ, мкм	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
TiO ₂	1,9	3,5	3,7	4,5	6	6,5	7	— *	— *	
Cu ₂ O	2,1	2,8	3,3	5,5	3,7	3,9	4,1	— *	— *	

* при данных длинах волн спектра, спектрометр показывает шумы и поиск искомых параметров затруднен или невозможен.

Заключение

Проведенное комплексное спектрометрическое исследование позволило подтвердить предположение о возможности применения разработанного селективного покрытия в солнечном коллекторе комбинированного типа действия и правильность подобранной концентрации активного вещества раствора (TiO₂) — 7,5 г TiO₂ на 100 мл раствора. Помимо этого, были получены характеристики, которые позволяют добиться высокой эффективности работы покрытия — спектральная степень

черноты в рабочем диапазоне ИК спектра — для работы в дневном режиме работы 0,94 в ночном режиме 0,83, количество слоев суспензии TiO₂ наносимых на пластину комбинированного солнечного коллектора — 6 слоев толщиной 10 мкм.

Полученные в результате экспериментальных исследований данные в дальнейшем лягут в основу создания опытного образца комбинированного солнечного коллектора для проведения натурного эксперимента по оценке эффективности работы теплообменного аппарата.

Литература

1. Камара С., Сулин А. Б., Малинина О. С. Энергетический и экономический анализ системы хладоснабжения на базе абсорбционной бромистолитиевой гелиохолодильной машины с коллектором двойного действия. // Вестник Международной академии холода. 2022. № 4. С. 3–14. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-4-3-14

References

1. Camara S., Sulin A. B., Malinina O. S. Energy and economic analysis of a solar cooling system driven by a double-acting collector. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2022. No 4. p. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-4-3-14. (in Russian)
 2. Toropov A. L. Combined thermal solar systems. Part 1. Thermal solar collectors for individual and decentralized heating

2. *Торопов А. Л.* Комбинированные тепловые гелиосистемы. Ч. 1. Тепловые солнечные коллекторы для индивидуальных и децентрализованных систем отопления и горячего водоснабжения // Издательский дом Академии Естествознания. 2019. 88 с. DOI: 10.17513/np. 346
3. *Бажанов А. Г.* Интенсификация теплопередачи модели солнечного коллектора / А. Г. Бажанов, С. Н. Глухов // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы. // Материалы Международной научно-практической конференции, Саранск, 25–26 ноября 2020 года. Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва 2020. С. 311–316.
4. *Vardanyan R. R.* A linear model for determining the optimal tilt angle of solar collectors / R. R. Vardanyan, N. K. Badalyan // Proceedings of National Polytechnic University of Armenia. Electrical Engineering, Energetics. 2022. No. 1. P. 78–87. DOI: 10.53297/18293328–2022.1–78.
5. *Шеин В. М., Сулин А. Б., Муравейников С. С.* Проектирование комбинированного теплового коллектора на основе возобновляемых источников энергии. // Школа молодых новаторов: сборник научных статей 3-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых (Курск, 17 июня 2022 г.) 2022. Т. 3. С. 351–353.
6. *Цой А. П., Бараненко А. В., Грановский А. С., Цой Д. А.* Моделирование работы установки с радиационным охлаждением для кондиционирования воздуха // Вестник Международной академии холода. 2019. № 3. С. 3–4. DOI: 10.17586/1606-4313-2019-18-3-3-14
7. *Камава С., Сулин А. Б., Лысев В. И.* Аналитическое исследование производительности коллектора комбинированного типа для солнечного нагрева и ночного радиационного охлаждения // Вестник Международной академии холода. 2022. № 1. С. 26–36. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-1-26-36
8. *Liu D.* A thermally stable cooler for efficient passive radiative cooling throughout the day. // *Opt Mater (Amst)* 2019. Vol. 92. DOI: 10.1016/j. optmat. 2019.04.061.
9. *Cheng Z., Wang F., Wang H., Liang H., Ma L.* Effect of embedded polydisperse glass microspheres on radiative cooling of a coating. // *Int. J. Therm.* 2019. Vol. 140. pp. 358–367. DOI: 10.1016/j. ijthermalsci. 2019.03.014
10. *Katramiz E., Ghaddar N.* 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. DOI: 10.1016/j. jobe. 2019.101020.)
11. *Zhao B., Hu M., Ao X.* Performance evaluation of daytime radiative cooling under different clear sky conditions. // *Appl Therm Eng.* — 2019. Vol. 155. DOI: 10.1016/j. applthermaleng. 2019.04.028.)
12. *Cai L., Song A. Y., Li W.* Spectrally selective nanocomposite textile for outdoor personal cooling // *Adv. Mater.* 2018. Vol. 30 DOI 10.1002/adma. 201802152
13. *Song Jianing & Zhang Wenluan & Sun Zhengnan & Pan Mengyao & Tian Feng & Li Xiuhong & Ye Ming & Deng Xu.* Durable radiative cooling against environmental aging. // *Nature Communications*. 2022 № 13. 4805. DOI: 10.1038/s41467-022-32409-7.
14. *Katramiz E., Ghaddar N., Ghali K.* 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. DOI: 10.1016/j. jobe. 2019.101020.
15. *Li Na & Wang Junfeng & Liu Defang & Huang Xia & Xu Zhikui & Zhang Chenyang & Zhang Zhijie & Zhong Mingfeng.* Selective spectral optical properties and structure of aluminum phosphate for daytime passive radiative cooling application. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2019. vol. 194. P. 103–110. DOI: 10.1016/j. solmat. 2019.01.036
- and hot water supply systems. Publishing house of the Academy of Natural Sciences. 2019. 88 p. DOI: 10.17513/np. 346. (in Russian)
3. *Bazhanov A. G.* Intensification of heat transfer of a solar collector model / A. G. Bazhanov, S. N. Glukhov. *Energy-efficient and resource-saving technologies and systems*. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Saransk, November 25–26, 2020. Saransk: National Research Mordovian State University named after N. P. Ogarev. 2020. P. 311–316. (in Russian)
4. *Vardanyan R. R.* A linear model for determining the optimal tilt angle of solar collectors / R. R. Vardanyan, N. K. Badalyan. *Proceedings of National Polytechnic University of Armenia. Electrical Engineering, Energetics*. 2022. No. 1. P. 78–87. DOI: 10.53297/18293328–2022.1–78.
5. *Shein V. M., Sulin A. B., Muraveynikov S. S.* Design of a combined thermal collector based on renewable energy sources. *School of young innovators: collection of scientific articles of the 3rd International Scientific Conference of Advanced Developments of Young Scientists (Kursk, June 17, 2022)* 2022. Vol. 3. P. 351–353. (in Russian)
6. *Tsoi A. P., Baranenko A. V., Granovsky A. S., Tsoi D. A.* Modeling the operation of a unit with radiant cooling for air conditioning. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2019. No. 3. P. 3–4. DOI: 10.17586/1606-4313-2019–18-3-3-14. (in Russian)
7. *Camara S., Sulin A. B., Lysev V. I.* Analyzing the performance of a combined type collector for solar heating and night radiation cooling. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2022. No 1. p. 26–36. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-1-26-36. (in Russian)
8. *Liu D.* A thermally stable cooler for efficient passive radiative cooling throughout the day. *Opt Mater (Amst)*. 2019. Vol. 92. DOI: 10.1016/j. optmat. 2019.04.061.
9. *Cheng Z., Wang F., Wang H., Liang H., Ma L.* Effect of embedded polydisperse glass microspheres on radiative cooling of a coating. *Int. J. Therm.* 2019. Vol. 140, pp. 358–367. DOI: 10.1016/j. ijthermalsci. 2019.03.014
10. *Katramiz E., Ghaddar N.* 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. DOI: 10.1016/j. jobe. 2019.101020.
11. *Zhao B., Hu M., Ao X.* Performance evaluation of daytime radiative cooling under different clear sky conditions. // *Appl Therm Eng.* — 2019. Vol. 155. — DOI: 10.1016/j. applthermaleng. 2019.04.028.)
12. *Cai L., Song A. Y., Li W.* Spectrally selective nanocomposite textile for outdoor personal cooling. *Adv. Mater.* 2018. Vol. 30. DOI: 10.1002/adma. 201802152
13. *Song Jianing & Zhang Wenluan & Sun Zhengnan & Pan Mengyao & Tian Feng & Li Xiuhong & Ye Ming & Deng Xu.* Durable radiative cooling against environmental aging. *Nature Communications*. 2022. No 13. P. 4805. DOI: 10.1038/s41467-022-32409-7.
14. *Katramiz E., Ghaddar N., Ghali K.* 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. DOI: 10.1016/j. jobe. 2019.101020.
15. *Li Na & Wang Junfeng & Liu Defang & Huang Xia & Xu Zhikui & Zhang Chenyang & Zhang Zhijie & Zhong Mingfeng.* Selective spectral optical properties and structure of aluminum phosphate for daytime passive radiative cooling application. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2019. vol. 194. P. 103–110. DOI: 10.1016/j. solmat. 2019.01.036

- time passive radiative cooling application. // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2019. vol. 194. P. 103–110. DOI: 10.1016/j.solmat.2019.01.036
16. Bao H., Yan Ch., Wang B. Double-layer nanoparticle-based coatings for efficient terrestrial radiative cooling // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2017. Vol. 168. pp. 78–84. DOI: 10.1016/j.solmat.2017.04.020.
 17. Шейн В. М., Сулин А. Б., Никитин А. А. Исследование процессов теплообмена излучением в тепловом коллекторе двойного действия для предприятий горнодобывающей промышленности. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2024. № 7–1. С. 176–192. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_71_0_176
 18. Ahmed Salman & Li Zhenpeng & Javed Muhammad & Ma Tao. A review on the integration of radiative cooling and solar energy harvesting. // *Materials Today Energy*. 2021. 100776. DOI: 10.1016/j.mtener.2021.100776.
 19. Рахимов Н. Р. Оптоэлектронные НПВО методы определения физико-химических параметров нефти и нефтепродуктов. // Современные технологии в нефтегазовом деле. Сборник трудов Международной научно-технической конференции, посвященной 60-летию филиала, Октябрьский, 25 марта 2016 г. Том 2. Октябрьский: Уфимский государственный нефтяной технический университет. 2016. С. 432–438.
 20. Деев И. А., Буриндин В. Г., Ельцов О. С. Исследование возможности применения данных НПВО ИК-Фурье спектроскопии для оценки степени кристалличности полиэтилена // Вестник Казанского технологического университета. 2021. № 1. С. 90–98.
 16. Bao H., Yan Ch., Wang B. Double-layer nanoparticle-based coatings for efficient terrestrial radiative cooling. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2017. Vol. 168. pp. 78–84. DOI: 10.1016/j.solmat.2017.04.020.
 17. Shein V. M., Sulin A. B., Nikitin A. A. Study of radiant heat exchange processes in a double-acting thermal collector for mining enterprises. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2024. No. 7–1. pp. 176–192. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_71_0_176. (in Russian)
 18. Ahmed Salman & Li Zhenpeng & Javed Muhammad & Ma Tao. A review on the integration of radiative cooling and solar energy harvesting. *Materials Today Energy*. 2021. 100776. DOI: 10.1016/j.mtener.2021.100776.
 19. Rakhimov N. R. Optoelectronic FTIR methods for determining the physicochemical parameters of oil and oil products. *Modern technologies in the oil and gas business*. Collection of papers of the International scientific and technical conference dedicated to the 60th anniversary of the branch, Oktyabrsky, March 25, 2016. Volume 2. October: Ufa State Petroleum Technological University. 2016. P. 432–438. (in Russian)
 20. Deev I. A., Buryndin V. G., Yeltsov O. S. Investigation of the possibility of using the data of the NPVO IR-Fourier spectroscopy to assess the degree of crystallinity of polyethylene. *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2021. No. 1. pp. 90–98. (in Russian)

Сведения об авторах

Шейн Владислав Максимович

Аспирант, ассистент образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, shein512.54@gmail.com. ORCID: 0000-0002-0777-651X

Никитин Андрей Алексеевич

К. т. н., доцент образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, aanikitin@itmo.ru. ORCID: 0000-0002-0084-7282

Кораблев Владимир Антонович

К. т. н., доцент образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, kvant1953@gmail.com. ORCID: 0000-0002-6691-7140

Сулин Александр Борисович

Д. т. н., профессор образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, miconta@rambler.ru. ORCID: 0000-0002-4580-6070

Кривошеев Владимир Евгеньевич

К. т. н., доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика» Самарского государственного технического университета, Россия, г. Самара, ул. Галактионовская 141, krvidm@yandex.com. ORCID: 0000-0003-2365-1861

Information about authors

Shein Vladislav M.

Postgraduate student of Educational Center «Energy Efficient Engineering Systems» of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, shein512.54@gmail.com. ORCID: 0000-0002-0777-651X

Nikitin Andrey A.

Ph. D., associate professor of Educational Center «Energy Efficient Engineering Systems» of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, aanikitin@itmo.ru. ORCID: 0000-0002-0084-7282

Korablev Vladimir A.

Ph. D., associate professor of Educational Center «Energy Efficient Engineering Systems» of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, kvant1953@gmail.com. ORCID: 0000-0002-6691-7140

Sulin Aleksandr B.

D. Sc., professor of Educational Center «Energy Efficient Engineering Systems» of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, miconta@rambler.ru. ORCID 0000-0002-4580-6070

Krivosheev Vladimir E.

PhD. Associate Professor of Department of Industrial Heat Power Engineering, Samara State Technical University, Galaktionovskaya str. 141, Samara, Russia, krvidm@yandex.com. ORCID: 0000-0003-2365-1861

