

УДК 621.565.83

## Термоэлектрические системы охлаждения на солнечных элементах

*Д-р техн. наук А. Б. СУЛИН\*, Т. А. ХЕЙН, В. М. ШЕИН**Университет ИТМО**\*E-mail: miconta@rambler.ru*

*Системы охлаждения на солнечной энергии делятся на два типа. Системы, потребляющие тепловую энергию солнечного излучения, основаны на принципах сорбции и имеют множество реализаций в зависимости от температурного потенциала теплоносителя, который в свою очередь зависит от типа солнечного коллектора. Наибольший температурный потенциал обеспечивают концентрирующие коллекторы, являющиеся наиболее дорогими. Они позволяют реализовать эффективные двух- и трехступенчатые циклы абсорбционного охлаждения в бромисто-литиевых и водоаммиачных установках. Системы охлаждения на электрической энергии, получаемой от солнечных батарей, используют холодильные машины с электрическим приводом. Это парокомпрессионные системы и системы прямого преобразования энергии: термоэлектрические и на калорических эффектах (электрокалорические, магнетикалорические, пьезокалорические). Особенно следует выделить термоэлектрические системы на эффекте Пельтье, поскольку они потребляют энергию постоянного тока, которая вырабатывается солнечными панелями и не требует преобразования в переменный ток. В статье выполнен обзор научной литературы в области термоэлектрического охлаждения с солнечным приводом. Приведены схемные решения и технические характеристики двух групп данных систем: устройства для охлаждения внешних объектов и устройства для охлаждения собственно солнечных батарей для повышения их производительности.*

**Ключевые слова:** альтернативные источники энергии, солнечные элементы, термоэлектрическое охлаждение, тепловые режимы, энергоэффективность.

### Информация о статье:

Поступила в редакцию 05.03.2025, одобрена после рецензирования 05.05.2025, принята к печати 12.05.2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-2-31-39

Язык статьи — русский

### Для цитирования:

Сулин А. Б., Хейн Т. А., Шеин В. М. Термоэлектрические системы охлаждения на солнечных элементах. // Вестник Международной академии холода. 2025. № 2. С. 31–39. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-2-31-39

## Thermoelectric solar cooling systems

*D. Sc. A. B. SULIN\*, T. A. HEIN, V. M. SHEIN**ITMO University**\*E-mail: miconta@rambler.ru*

*Solar cooling systems are divided into two types. Cooling systems that consume solar thermal energy are based on sorption principles and have many implementations depending on the temperature potential of the heat transfer medium, which in turn depends on the type of solar collector. The highest temperature potential is provided by concentrating collectors which are the most expensive. They allow to realize efficient two- and three-stage absorption cooling cycles in lithium bromide and water-ammonia plants. Cooling systems based on electric energy from solar panels utilize electrically driven refrigeration machines. These are vapor-compression systems and direct energy conversion systems: thermoelectric and on caloric effects (electrocaloric, magnetocaloric, and piezocaloric). Specifically, it is necessary to emphasize thermoelectric systems on the Peltier effect, because they consume DC energy which is produced by solar panels and does not require conversion to AC. In the article a review of scientific literature in the field of solar-driven thermoelectric cooling is performed. The schematic solutions and technical characteristics of two groups of these systems are given: devices for cooling of external objects and devices for cooling of solar panels themselves to improve their performance.*

**Keywords:** alternative energy sources, solar cells, thermoelectric cooling, thermal modes, energy efficiency.

### Article info:

Received 05/03/2025, approved after reviewing 05/05/2025, accepted 12/05/2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-2-31-39

Article in Russian

**For citation:**

Sulin A. B., Hein T. A., Shein V. M. Thermoelectric solar cooling systems. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2025. No 2. p. 31-39. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-2-31-39

**Введение**

Энергия является важнейшим фактором выживания и играет решающую роль в экономическом развитии стран. В настоящее время 75% мировой энергии поступает от сжигания ископаемого топлива, что приводит к выбросу парниковых газов [1]. Возобновляемые источники энергии являются жизнеспособной альтернативой традиционным источникам энергии, которая может помочь снизить зависимость от ископаемого топлива и внести значительный вклад в развитие экономики и энергетическую безопасность.

Отсутствие электричества в отдаленных районах создает значительные проблемы с использованием обычных электроприборов, что негативно сказывается на уровне жизни и экономических перспективах жителей. Для решения этих проблем были проведены обширные исследования по разработке систем солнечного охлаждения.

Существует несколько областей применения солнечных холодильников: хранение вакцин и лекарств, хранение продуктов питания, изготовление льда, сельское хозяйство, бытовые морозильные камеры, кондиционирование воздуха и т. д. [2]. Сохранение вакцин является критическим фактором, определяющим использование солнечных фотоэлектрических систем охлаждения в удаленных районах с неразвитой инфраструктурой [3]. Кроме того, растущая доступность солнечных фотоэлектрических панелей делает солнечное охлаждение все более жизнеспособным для жилых помещений [4].

Ожидается, что к 2030 г. электрическая мощность, вырабатываемая за счет солнечной энергии, достигнет 402 ТВт·ч, при этом доля фотоэлектрических установок в общем объеме производства электроэнергии составит 280 ТВт·ч. Это означает, что солнечная фотоэлектриче-

ская энергия обладает значительным потенциалом для устойчивого удовлетворения энергетических потребностей [5].

Существует различные методы солнечного охлаждения: солнечное фотоэлектрическое, солнечное термоэлектрическое, солнечное термомеханическое и солнечное тепловое охлаждение. Первый подход предполагает использование солнечной системы на основе фотоэлектрических элементов, которая преобразует солнечную энергию в электрическую и применяет ее для охлаждения традиционными методами [6]. Второй метод предполагает охлаждение с помощью термоэлектрических процессов [7]. В третьем случае тепловая энергия солнца преобразуется в механическую энергию, которая впоследствии дает эффект охлаждения. И, наконец, тепловая энергия нагретого теплоносителя в солнечных коллекторах является приводом сорбционных систем охлаждения [8].

На рис. 1 показана классификация систем охлаждения на солнечной энергии [9].

В отличие от традиционных систем охлаждения, термоэлектрические тепловые насосы не имеют подвижных частей, что делает их компактными, легкими и надежными. Они находят применение в различных областях, включая охлаждение электроники, автомобильный климат-контроль и портативные холодильные установки. Несмотря на относительно низкую эффективность по сравнению с традиционными парокомпрессионными системами, ведущиеся исследования нацелены на улучшение их характеристик, что делает их эффективными и экологически чистыми решениями в области охлаждения и отопления. Более того, они потребляют энергию постоянного тока и могут быть интегрированы с чисты-

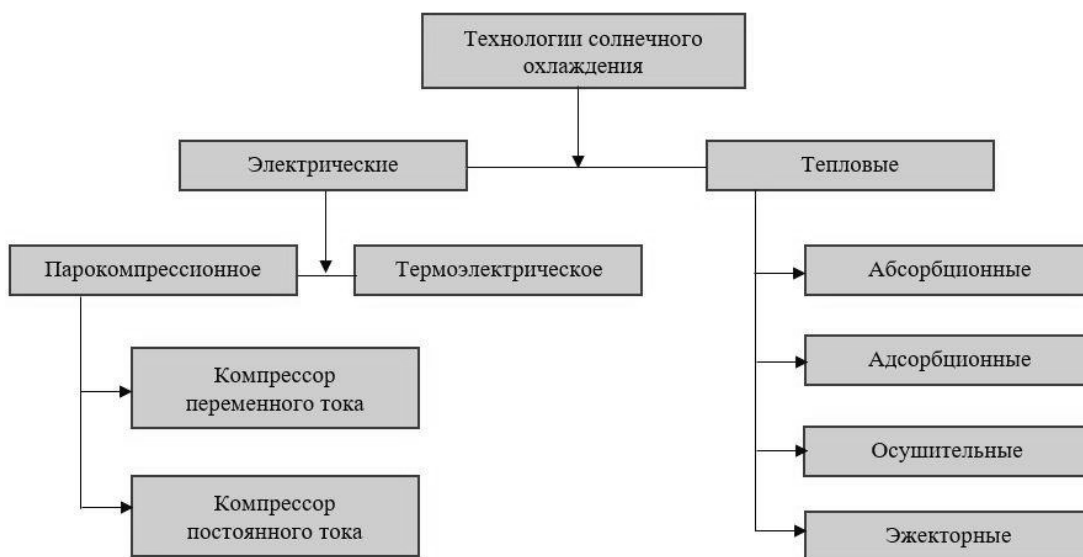


Рис. 1. Системы охлаждения на солнечной энергии [9]

Fig. 1. Solar-powered cooling systems [9]

ми источниками энергии, например, с фотоэлектрическими панелями, что еще больше увеличивает их экологические преимущества.

Целью данной работы является анализ современного состояния вопроса в области термоэлектрических систем охлаждения, интегрированных с солнечными фотоэлектрическими панелями.

### Классификация и схемные решения термоэлектрических систем охлаждения на солнечной энергии

В данной работе предлагается классифицировать информацию о рассматриваемых системах в соответствии со структурой, приведенной ниже.

1. По назначению.
  - 1.1. Охлаждаемые боксы.
  - 1.2. Системы вентиляции и кондиционирования.
    - 1.2.1. Для стационарных помещений.
    - 1.2.2. Для автомобильного транспорта.
  - 1.3. Охладители солнечных панелей.
    - 1.3.1. С использованием термоэлектрических генераторов.
    - 1.3.2. С использованием термоэлектрических тепловых насосов.

2. По схемному решению.

- 2.1. Системы прямого действия PV-ТЕС.
- 2.2. Системы двойного действия PV+ТЕG-ТЕС.
- 2.3. Со стационарными панелями.
- 2.4. Со слежением за солнцем.
- 2.5. Комбинированные системы.
  - 2.5.1. Системы с использованием фазовых переходов.
  - 2.5.2. Системы с использованием радиационного теплообмена.

Данная структура графически представлена на рис. 2.

#### Охлаждаемые боксы.

Классическим применением термоэлектрического охлаждения является термостатирование продукции в небольших объемах (боксах). Анализ литературы показывает, что в последнее время были предприняты многочисленные усилия для исследования производительности и эффективности таких термоэлектрических систем охлаждения с солнечным приводом [10]. Например, в [11] исследовали производительность термоэлектрического охладителя, работающего на солнечной энергии в условиях местного климата, используя статическую фотоэлектрическую систему и интегрируя ее с одним и двумя



Рис. 2. Термоэлектрические системы охлаждения на солнечной энергии

Fig. 2. Thermoelectric solar cooling systems

термоэлектрическими модулями. Исследование показало, что в условиях естественной и принудительной конвекции COP системы охлаждения составлял 0,41, 0,57 и 0,61 при работе одного, двух термоэлектрических модулей и двух термоэлектрических модулей с вентилятором соответственно.

В работе [12] описан проект системы охлаждения для условий пустыни вдали от национальной электрической сети. В системе использовано десять термоэлектрических модулей, каждый из которых имел максимальную выходную холодопроизводительность 5,1 Вт. Температура охлаждаемого объема снизилась с 27 °C до 5 °C менее чем за час. Было обнаружено, что общий КПД системы составляет порядка 0,16. В работе [13] экспериментально исследован головной убор на основе термоэлектрических модулей, работающий на солнечной энергии, для обеспечения теплового комфорта в условиях работы на улице в жарком климате. Результаты показали, что желаемый температурный градиент для теплового комфорта был успешно достигнут по сравнению с условиями окружающей среды.

Различные конфигурации радиатора с прямоугольной и лепестковой конфигурациями исследованы в работе [14] для рассеивания тепла от солнечной системы охлаждения. Максимальный COP для данной системы составил 0,67 и 0,32 для лепестковой и прямоугольной конфигураций радиатора соответственно. Следует отметить, что COP системы максимален при оптимальном значении солнечной радиации.

В работе [15] описана автономная система, интегрированная с аккумуляторной батареей, инвертором и контроллером заряда. Потребляемая мощность термоэлектрических модулей составила 220 Вт. При установке под углом 15° к горизонтали максимальная холодопроизводительность солнечной батареи, обращенной на юг, составила 230 Вт.

Несмотря на то, что COP термоэлектрических систем охлаждения с солнечным приводом низок по сравнению с традиционными системами, в настоящее время проводится большая работа по улучшению их энергетической эффективности. Разрабатываются новые конструкции и материалы, поэтому есть большая надежда, что данные

системы можно будет эффективно использовать наряду с традиционными системами охлаждения бытового и коммерческого назначения [16].

Термоэлектрические системы охлаждения, применяемые в медицине, продемонстрировали, что термоэлектрические модули могут эффективно поддерживать температуру в диапазоне от 2 до 17 °C. В работе [17] описан термоэлектрический охладитель, работающий на солнечной энергии, для хранения различных лекарств в пределах 15 и 17 °C.

На другой диапазон температур от 3 до 4 °C разработан охладитель вакцин на солнечных батареях [18]. Энергопитание устройства осуществляется от аккумуляторной батареи и солнечной панели мощностью 60 Вт. Эта система может поддерживать 216 г вакцин в этом температурном диапазоне в течение 13 часов, причем 5 часов только от аккумулятора. В работе [19] описан контейнер, способный хранить максимум 6 шприцевых единиц инсулина. Контейнер, изготовленный с использованием солнечных батарей панели и термоэлектрического охладителя, использовал три 50-ваттные солнечные панели для зарядки 12-вольтовой батареи. При этом обеспечено поддержания температуры препарата в диапазоне от 2 до 8 °C. В статье [20] описан портативный охладитель вакцин, способный достигать минимальной температуры 3,4 °C при снижении энергопотребления более чем на 50%. Экспериментальное исследование термоэлектрического холодильника для вакцин приведено в [21]. Тепловая нагрузка снижена благодаря использованию вакуумной теплоизоляции.

Для увеличения времени устойчивой работы термоэлектрического холодильника с энергопитанием от солнечной батареи в работе [22] предложено использовать материал с фазовым переходом (рис. 3).

Результаты измерения температурного режима пищевых продуктов, размещенных в камере, приведены на рис. 4.

Из приведенных графиков видно, что система эффективно охлаждает пищевые продукты с содержанием воды от 50% до 99%, достигая заданной температуры в течение 2–4 ч. При этом COP составил 0,69, что демонстрирует высокую энергоэффективность.

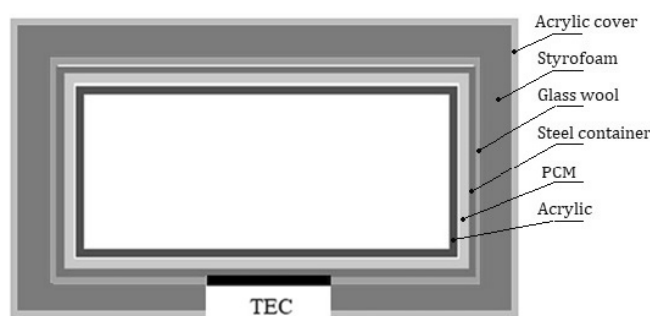


Рис. 3. Камера термоэлектрического холодильника [22]

Fig. 3. Thermoelectric fridge chamber [22]

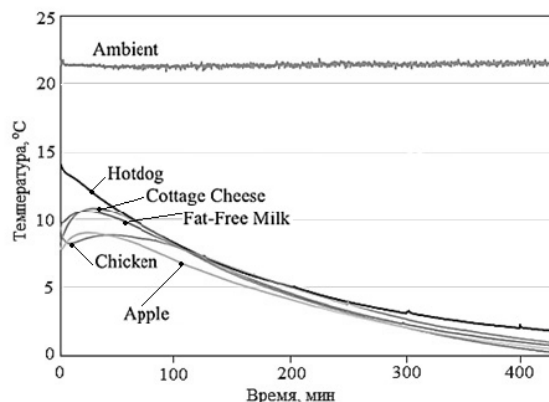


Рис. 4. Температура пищевых продуктов в охлаждаемой камере [22]

Fig. 4. Food temperature in the refrigerated chamber [22]

### Системы вентиляции и кондиционирования.

Применение термоэлектрических систем с солнечным приводом для задач кондиционирования и вентиляции (PV/TEV) вызывает значительный интерес исследователей. Например, в работе [23] такая система с водяным охлаждением термоэлектрического блока продемонстрировала снижение температуры на 5 °C при холодопроизводительности 570 Вт с COP 1,27. Модельные исследования с охлаждением помещения объемом 1 м<sup>3</sup> [24] подтвердили поддержание температуры 27 °C в широком диапазоне тепловых нагрузок. Инновационная схема системы охлаждения воздуха с радиационным охлаждением чьеёк солнечной панели приведена в [25] (рис. 5).

Система продемонстрировала удельную холодопроизводительность 93 Вт/м<sup>2</sup> с COP 0,64 при оптимальном соотношении площади термоэлектрических модулей к площади радиационной панели 0,3.

В [26] описаны экспериментальные характеристики системы вентиляции с солнечным приводом, которая снижает температуру помещения на 5–16 °C с COP 1,04 и 1,41 при снижении температуры на 10 °C и 7 °C соответственно. Система малой мощности [27] обеспечивает персональное охлаждение с холодопроизводительностью 55 Вт и COP 0,5.

Система кондиционирования с солнечным приводом двойного действия от солнечной панели и термоэлектрического генератора описана в [28] (рис. 6).

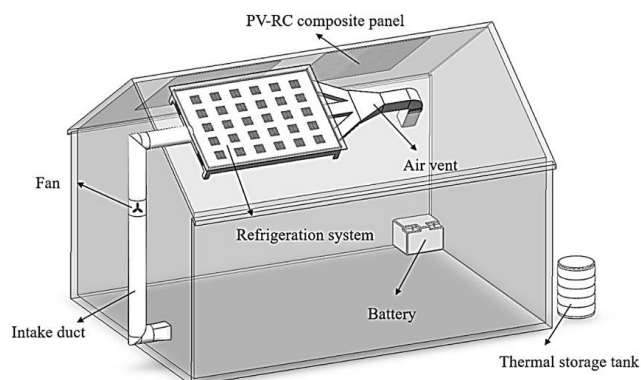


Рис. 5. Схема PV/TEV системы с радиационным охлаждением [25]

Fig. 5. Diagram of PV/TEV system with radiation cooling [25]

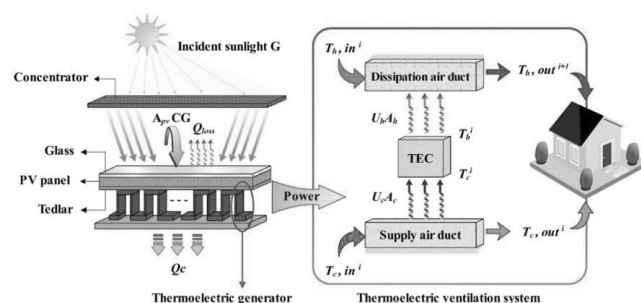


Рис. 7. Схема системы кондиционирования с приводом двойного действия [29]

Fig. 7. Diagram of air conditioning system with double-acting drive [29]

Особенностью данной системы является применение термоэлектрического блока как для охлаждения солнечной панели, так и для дополнительной генерации электроэнергии с последующим использованием в термоэлектрическом кондиционере. Максимальная мощность, генерируемая системой двойного действия, составляет 59, 103, 133 и 150 Вт при степени концентрации солнечного излучения от 1 до 5, соответственно. Отмечено, что мощность солнечной панели при дополнительной установке термоэлектрического генератора увеличивается на 14%.

Еще одна система кондиционирования с солнечным приводом двойного действия описана в [29] (рис. 7).

В исследовании предложены два новых параметра: индикатор энергетической эффективности  $P_{\text{en}}$  и индикатор эксергетической эффективности  $P_{\text{ex}}$ , которые определяют вклад системы PV/TEG-TEV в обеспечение тепловой и холодильной нагрузки здания. Показано, что  $P_{\text{en}}$  достигает максимального значения в сентябре, а  $P_{\text{ex}}$  — в апреле и в мае.

Автомобильные термоэлектрические системы охлаждения всегда привлекали внимание исследователей. В работе [30] предложена схема системы с солнечной батареей, установленной на крыше кабины (рис. 8).

Применение данной системы кондиционирования в климатических условиях Египта позволяет увеличить дальность хода автомобиля на 10,4 км/день и сэкономить

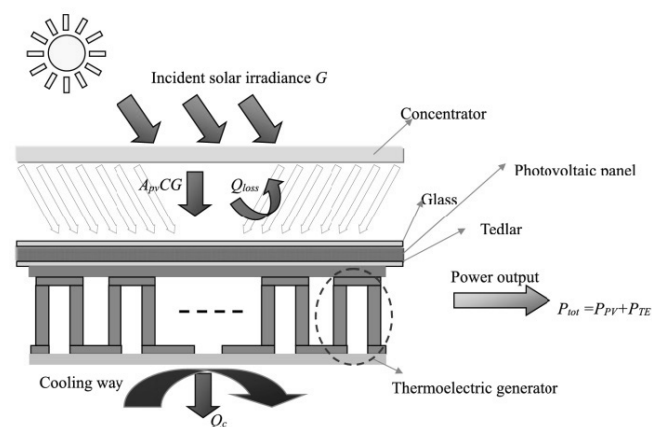


Рис. 6. Схема солнечного привода двойного действия [28]

Fig. 6. Double-acting solar drive scheme [28]

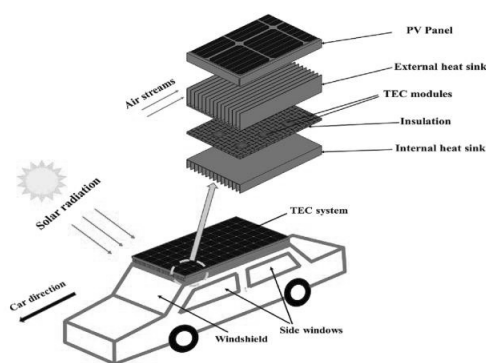


Рис. 8. Схема автомобильной PV/TEV системы [30]

Fig. 8. Diagram of vehicle PV/TEV system [30]

около 160 кВтч/год энергии. Снижение потребляемой мощности достигает 27,8% при увеличении скорости автомобиля с 30 до 60 км/ч, в то время как этот показатель составляет 10,8% при увеличении скорости автомобиля с 60 до 90 км/ч.

Тепловой комфорт пассажиров кроме кондиционера может обеспечивать менее энергоемкая система охлаждения сидений [31] (рис. 9).

Особенностью системы является раздельное исполнение охлаждающей и нагревающей части термоэлектрического блока с помощью гибких проводников, что решает проблему организации эффективного теплоотвода в условиях автомобильного сиденья. Показано, что вклад фотоэлектрической панели, может сэкономить около 215 кВтч энергии и увеличить дальность поездки электромобилей примерно на 1435 км в годовом исчислении.

#### *Охладители солнечных панелей.*

Несмотря на то, что КПД солнечных батарей варьируется в пределах приблизительно 5–20% [32], их практическое применение в последние годы стремительно нарастает при снижении стоимости. Однако с повышением температуры батареи под воздействием солнечного излучения происходит значительное снижение эффективности фотоэлементов со скоростью 0,25–0,5% на градус Цельсия, в зависимости от конкретного материала фотоэлемента [33]. Постоянная работа при повышенных температурах также снижает долговечность фотоэлектрического модуля в долгосрочной перспективе, сокращая срок его службы [34].

В то время как были разработаны многочисленные методы охлаждения для фотоэлектрических панелей для увеличения общей выходной мощности, многие из них требуют использования внешних сред (таких как вода или принудительно подаваемый воздух), что может ока-

заться непрактичным в конкретных условиях эксплуатации. В этой связи термоэлектрическое охлаждение солнечных панелей рассматривается как эффективное решение данной проблемы [35].

В работе [36] описана установка с четырьмя термоэлектрическими модулями на фотоэлектрической панели с радиаторами и охлаждающим вентилятором. В результате показано значительное повышение выходной мощности панели на 21%. В статье [37] использован генетический алгоритм и моделирование в MATLAB для оптимизации температуры фотоэлектрической панели. При этом выявлено значительное влияние температуры окружающей среды на температуру фотоэлементов.

В работе [38] использовано несколько термоэлектрических модулей на фотоэлектрических панелях и достигнуто повышения общей эффективности на 32%.

В работе [39] рассмотрена модель системы с термоэлектрическими модулями в режиме охлаждения и генерации, что позволило снизить потери выходной мощности на 12% при температуре 41,9 °C.

На рис. 10 и 11 приведены условные схемы установок с термоэлектрическим охлаждением солнечной панели [38, 39].

Результаты измерения температуры солнечной панели без использования термоэлектрического охлаждения (верхний график) и с его использованием (нижний график) приведены на рис. 12 [38].

Поскольку фотоэлектрические солнечные элементы преобразуют лишь часть падающего солнечного излучения, они поглощают около 16% падающей энергии, а остальная часть излучения преобразуется в тепло и способствует повышению температуры фотоэлектрических панелей, что сказывается на производительность этих элементов [40, 41]. В работе [42] исследована система с термоэлектрическим охлаждением солнечной панели, схема которой приведена на рис. 13.

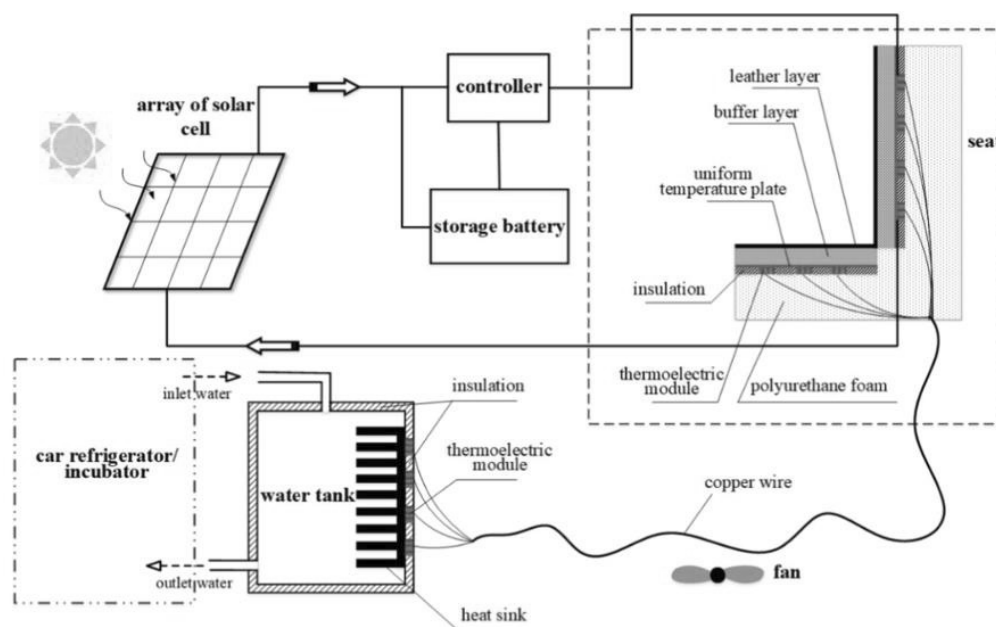


Рис. 9. Схема PV/TE системы охлаждения сидений [31]

Fig. 9. Diagram of the PV/TE seat cooling system [31]

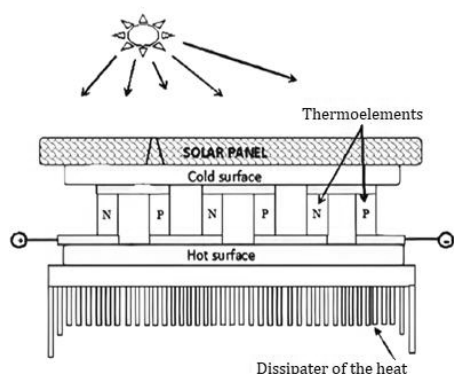


Рис. 10. Схема установки [39]

Fig. 10. Installation scheme [39]

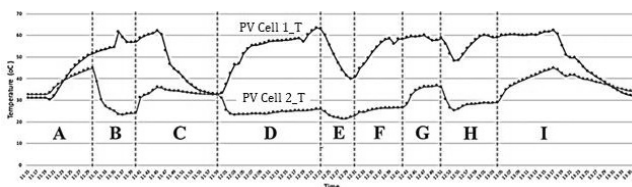


Рис. 12. Результаты измерений температуры солнечной панели [38]

Fig. 12. Results of solar panel temperature measurements [38]

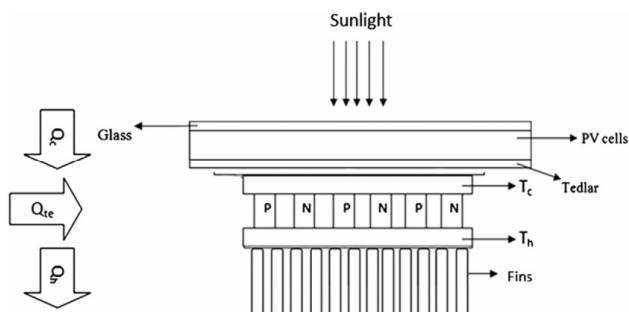


Рис. 14. Схема установки [43]

Fig. 14. Installation scheme [43]

В работе [43] показано, что использование термоэлектрических охлаждающих модулей позволяет успешно поддерживать температуру фотоэлементов на приемлемом уровне, потребляя разумное количество электроэнергии. Схема моделируемой установки показана на рис. 14. Результаты вычислений — на рис. 15.

Из рис. 15 видно, что при токе питания термоэлектрического модуля порядка 2 А температура фотоэлемента снижается более, чем на 15 К.

### Заключение

Характерные особенности термоэлектрических систем охлаждения, такие как экологичность, надежность и бесшумность, в сочетании с невысоким коэффициентом преобразования для больших мощностей, определяют области их применения в системах с солнечным приво-

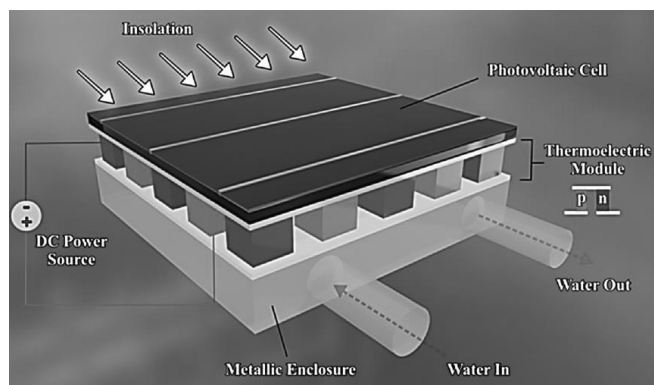


Рис. 11. Схема установки [38]

Fig. 11. Installation scheme [38]

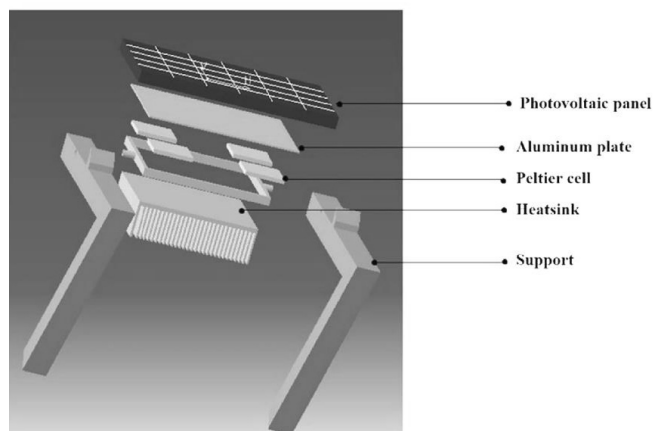


Рис. 13. Схема установки [42]

Fig. 13. Installation scheme [42]

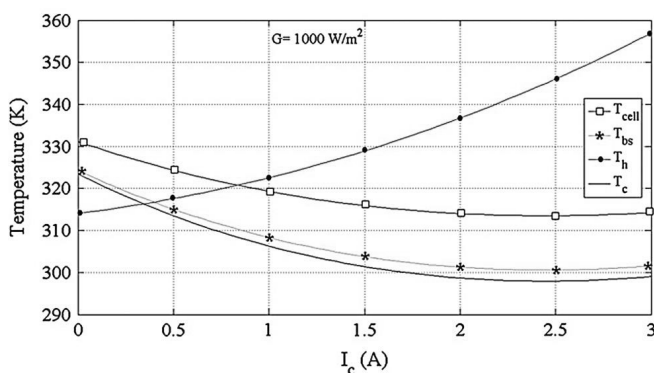


Рис. 15. Результаты моделирования температурного режима [43]

Fig. 15. Results of temperature modeling [43]

дом. Наиболее рациональная и социально значимая область применения — это охлаждаемые боксы для продуктов и медикаментов в труднодоступных районах с неразвитой энергоструктурой. Данные районы с жарким климатом характеризуются высокой солнечной инсоляцией, что повышает производительность солнечных фотоэлектрических панелей.

Для более энергоемких систем, таких как кондиционирование воздуха, эффективно применение комбинированных устройств с использованием веществ с фазовым

переходом, пассивных излучателей в космическое пространство и дополнительных генераторов электроэнергии на базе термоэлектрических блоков. Отметим, что применение веществ с фазовым переходом с аккумулированием тепловой энергии способствует повышению устойчивости работы системы в условиях переменной солнечной инсоляции.

В отдельный класс, требующий интенсификации исследований, следует выделить термоэлектрические системы охлаждения собственно солнечных элементов для снижения их температуры при интенсивной инсоляции и повышения эффективности преобразования энергии. При этом могут использоваться как генераторные блоки, реализующие эффект Зеебека, так и охлаждающие блоки, реализующие эффект Пельтье.

Перспективы исследований в области термоэлектрических систем охлаждения с солнечным приводом могут, по мнению авторов, быть связаны с решением задачи многофакторной оптимизации. Исходная матрица для выполнения оптимизации должна включать альтернативные технические решения систем охлаждения, каждому из которых соответствует набор факторов. Факторами могут являться коэффициент преобразования, эксергетический КПД, стоимость, срок окупаемости, ресурс работы и другие. В качестве методики многофакторной оптимизации может быть использован алгоритм, реализующий поиск альтернативного решения по степени наибольшего приближения к идеально позитивному (метод Паретто). Данная методика в настоящее время эффективно используется для оптимизационного анализа энергетических систем.

### Литература/References

1. Yüksel I. Global warming and renewable energy sources for sustainable development in Turkey. *Renew. Energy*. 2008. vol. 33 (4), 802–812.
2. Alsagri A. S. Photovoltaic and photovoltaic thermal technologies for refrigeration purposes: an overview. *Arab. J. Sci. Eng.* 2022. 47 (7), 7911–7944.
3. Raihan Uddin M., et al. Energy analysis of a solar driven vaccine refrigerator using environment-friendly refrigerants for off-grid locations. *Energy Convers. Manag.* 2021. X 11, 100095.
4. Opoku R., Anane S., Edwin I. A., Adaramola M. S., Seidu R. Comparative techno-economic assessment of a converted DC refrigerator and a conventional AC refrigerator both powered by solar PV. *Int. J. Refrig.* 2016. 72, 1–11.
5. Hermann W. Quantifying global exergy resources. *Energy*. 2006. 31 (12), 1685–1702.
6. Gunapriya B. et al. Modelling and Design of Solar-Powered DC Refrigerator for Vaccines Transportation in Remote Areas. In: 2022 3rd International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC), Oct. 2022.
7. S. Rajasekaran, A. B. K. Reddy, K. Saiteja, P. Rajesh, Pritam Raj. Portable thermoelectric refrigeration system using solar energy, In: 2022 4th International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA), Sep. 2022.
8. Kalkan N., Young E. A., Celiktaş A., Solar thermal air conditioning technology reducing the footprint of solar thermal air conditioning. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2012. 16 (8), 6352–6383.
9. Gourab Saha, AKM Abdul Malek Azad. A review of advancements in solar PV-powered refrigeration: Enhancing efficiency, sustainability, and operational optimization. *Energy. Reports* 12. 2024. 1693–1709.
10. S. B. Riffat, X. Ma, Improving the coefficient of performance of thermoelectric cooling systems: a review, *Int. J. Energy Res.* 2004. 28 (9). P. 753–768.
11. N. Alam, M. Salman Ali, S. Sajid, D. Sharma, Z. Hasan, Experimental investigation and analysis of cooling performance of solar thermoelectric refrigerator, *Sol. Energy* 263 (August) (2023) 111892.
12. S. A. Abdul-Wahab, et al., Design and experimental investigation of portable solar thermoelectric refrigerator, *Renew. Energy*. Jan. 2009. 34 (1). P. 30–34.
13. T. Hara, H. Azuma, H. Shimizu, H. Obora, S. Sato, Cooling performance of solar cell driven, thermoelectric cooling prototype headgear, *Appl. Therm. Eng.* Nov. 1998. 18 (11). P. 1159–1169.
14. M. M. S. A. Qamar, M. Farooq, M. Amjad, H. Bilal, Effect of heat sink configuration on the COP of thermoelectric vaccine refrigerator, *J. Facul. Eng. Technol.* 2016. 23 (1). P. 33–43.
15. R. Saidur, et al., Performance investigation of a solar powered thermoelectric refrigerator, *Int. J. Mech. Mater. Eng.* 2008. 3 (1). p. 7–16.
16. W. He, G. Zhang, X. Zhang, J. Ji, G. Li, X. Zhao, Recent development and application of thermoelectric generator and cooler, *Appl. Energy*. 2015. 143. P. 1–25.
17. S. Rajasekaran, A. B. K. Reddy, K. Saiteja, P. Rajesh, P. V. Raj, Portable thermoelectric refrigeration system using solar energy, in: 4th International Conference on Inventive Research in Computing Applications, ICIRCA 2022 — Proceedings, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 235–240.
18. J. J. Mil'on Guzm'an, S. L. Braga, J. C. Zúñiga Torres, H. J. Del Carpio Beltr'an. Solar thermoelectric cooling technology applied to transport of vaccines in isolated communities, in E3S Web of Conferences, EDP Sciences, Jul., 2020.
19. J. A. D. Nohay, et al. Design and fabrication of a portable solar powered thermoelectric refrigerator for insulin storage, in: 2020 11th IEEE Control and System Graduate Research Colloquium, ICSGRC 2020 — Proceedings, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Aug. 2020, pp. 150–154.
20. B. Ohara, R. Sitar, J. Soares, P. Novisoff, A. Nunez-Perez, H. Lee, Optimization strategies for a portable thermoelectric vaccine refrigeration system in developing communities, *J. Electron. Mater.* Jun. 2015. 44 (6). P. 1614–1626.
21. S. Thiangchanta, T. A. Do, W. Tachajapong, Y. Mona, Experimental investigation of the thermoelectric cooling with vacuum wall system, *Energy Rep.* Dec. 2020. 6. P. 1244–1248.
22. Erin Fenton, Mehran Bozorgi, Syeda Tasnim, Shohel Mahmud Solar-powered thermoelectric refrigeration with integrated phase change material: An experimental approach to food storage. *Journal of Energy Storage*. 79 (2024) 110247.
23. B. Bakthavatchalam, K. Habib, R. Saidur, B. B. Saha. Cooling performance analysis of nanofluid assisted novel photovoltaic thermoelectric airconditioner for energy efficient buildings. *Appl. Therm. Eng.* 213 (2022) 118691.
24. M. E. Zayed, M. M. Aboelmaaref, M. Chazy. Design of solar airconditioning system integrated with photovoltaic panel and thermoelectric coolers: experimental analysis and machine learning modeling by random vector functional link coupled



- with white whale optimization. *Therm. Sci. Eng. Prog.* 44 (2023) 102051.
25. S. Lv, M. Zhang, J. Tian, Z. Zhang, Z. Duan, Y. Wu, Y. Deng. Performance analysis of radiative cooling combined with photovoltaic-driven thermoelectric cooling system in practical application. *Energy*. 294 (2024) 130971.
  26. R. Chandel, S. S. Chandel, D. Prasad, R. P. Dwivedi. Experimental analysis and modelling of a photovoltaic powered thermoelectric solid-state cooling system for transition towards net zero energy buildings under different solar loading conditions. *J. Clean. Prod.* 442 (2024) 141099.
  27. K. Irshad, S. Rehman, MdH. Zahir, F. Khan, D. Balakrishnan, B. B. Saha, Analysis of photovoltaic thermoelectric air conditioning for personalized cooling in arid climate // *J. Build. Eng.* 84 (2024) 108533
  28. Yang Cai, Wei-Wei Wang, Cheng-Wei Liu, Wen-Tao Ding, Di Liu d, Fu-Yun Zhao. Performance evaluation of a thermoelectric ventilation system driven by the concentrated photovoltaic thermoelectric generators for green building operations. *Renewable Energy*. 147 (2020) 1565e1583.
  29. Yejiang Xing, Suqi Wang The energy and exergy examination of a thermoelectric ventilation system powered by photovoltaic/thermoelectric for space cooling and heating in a residential building. *Journal of Building Engineering*. 98 (2024) 111305.
  30. Hossam Eldein Abdelfattah Mohamed Ahmed, ets. Novel design of thermo-electric air conditioning system integrated with PV panel for electric vehicles: Performance evaluation. *Applied Energy*. 349 (2023) 121662.
  31. Yanmei Su, Ruoyun Wu, Jinwen Yang, Chaoyang Mou, Jitian Han. Research Paper Performance evaluation on a novel split thermoelectric system driven by solar energy for electric vehicle seats. *Applied Thermal Engineering*. 253 (2024) 123801.
  32. M. S. Kumar, K. R. Balasubramanian, L. Maheswari. Effect of temperature on solar photovoltaic panel efficiency, *Int. J. Eng. Adv. Technol.* 8 (6) (2019) 2593–2595.
  33. G. T. V. Mooko, P. A. Hohne, K. Kusakana. Enhancing photovoltaic operation system efficiency and cost-effectiveness through optimal control of thermoelectric cooling. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 273 (2024) 112937.
  34. R. Chandel, S. S. Chandel. Performance analysis outcome of a 19-MWp commercial solar photovoltaic plant with fixed-tilt, adjustable-tilt, and solar tracking configurations, *Prog. Photovolt. Res. Appl.* (2021) 85.
  35. O. S. Sastry, R. Chandel, R. K. Singh, P. K. Dash, R. Kumar. Bandopadhyay Degradation analysis of different PV modules after prolonged field operation. In: Proceedings of the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2011, pp. 3495–3499.
  36. M. Owen-Bellini, E. L. Warren. Reliability of tandem solar cells and modules: what's next? *Energy*. 1 (4) (2023) 100062.
  37. H. Moshfegh, M. Eslami, A. Hosseini. Thermoelectric cooling of a photovoltaic panel. *The Role of Exergy in Energy and the Environment*. (2018) 625–634.
  38. S. Maryani, R. D. Kusumanto, R. S. Carlos. Solar panel optimization using peltier module TEC1–12706, *Journal of Mechanical, Civil and Industrial Engineering*. 4 (3) (2023) 43–50.
  39. D. Algül, D. I. R. I. Cüneyt. A method proposal to increase the efficiency of photovoltaic panels integrated to buildings in both cold and hot seasons. *Journal of Architectural Sciences and Applications*. 6 (1) (2021) 227–236.
  40. I. Najihi, C. Ennawaoui, A. Hajjaji, Y. Boughaleb. Theoretical modeling of longitudinal piezoelectric characteristic for cellular polymers. *Cell. Polym.* 02624893211055830 (2021).
  41. J. G. Ingersoll. Simplified calculation of solar cell temperatures in terrestrial photovoltaic arrays. *ASME J. Solar Energy Eng.* 108 (1986) 95–101.
  42. Hafsa Kandry, Chouaib Ennawaoui, El Mehdi Laadissi, El Mehdi Loualid, Abdessamad El Ballouti, Zakaria Malki, Mohamed El Jouad, Adil Balhamri, Abdelowahed Hajjaji. Optimized photovoltaic panels power using cooling system based thermoelectric materials. *Materials Today: Proceedings*. 66 (2022) 479–483.
  43. Hamidreza Najafi, Keith A. Woodbury Optimization of a cooling system based on Peltier effect for photovoltaic cells. *Solar Energy*. 91 (2013) 152–160.

### Сведения об авторах

#### Сулин Александр Борисович

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

#### Хейн Тхэ Аун

Аспирант образовательного центра  
«Энергоэффективные инженерные системы»  
Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург,  
ул. Ломоносова, 9, heinhetaung489686@gmail.com

#### Шейн Владислав Максимович

Аспирант, ассистент образовательного центра  
«Энергоэффективные инженерные системы»  
Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург,  
ул. Ломоносова, 9, shein512.54@gmail.com

### Information about authors

#### 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

#### Hein Htet Aung

Postgraduate student of Educational Center  
«Energy Efficient Engineering Systems» of ITMO University,  
191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9,  
heinhetaung489686@gmail.com

#### 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



Статья доступна по лицензии  
Creative Commons «Attribution-NonCommercial»