

## ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕПЛОВЫЕ ВОЗДУШНЫЕ КОЛЛЕКТОРЫ: ПОСЛЕДНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ПОВЫШЕНИИ ИХ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И РАСШИРЕНИИ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ (ОБЗОР)

© 2025 г. S. Gardner<sup>a, b</sup>, L. M. Thomas<sup>a</sup>, B. P. Singh<sup>b</sup>, B. S. Gardner<sup>a, \*</sup>

<sup>a</sup>St. John's College, Mahatma Gandhi Rd, Agra, Uttar Pradesh, 282002 India

<sup>b</sup>Dr. Bhimrao Ambedkar University, Kalma Nagar, Civil Lines, Agra, Uttar Pradesh, 282004 India

\*e-mail: bobstanleygardner@gmail.com

Поступила в редакцию 22.02.2024 г.

После доработки 14.07.2024 г.

Принята к публикации 05.08.2024 г.

В последние годы популярность фотоэлектрических тепловых (PVT — от англ. photovoltaic-thermal) устройств чрезвычайно выросла, поскольку в них используется солнечное излучение (чистая энергия) и одновременно вырабатывается электрическая и тепловая энергия. В качестве теплоносителя в таких устройствах может применяться воздух, вода или наножидкость. Фотоэлектрический тепловой воздушный коллектор (PVTAC — от англ. photovoltaic thermal air collector) представляет собой PVT с воздушным охлаждением. Известно довольно большое количество работ, посвященных исследованию PVT-систем с водяным охлаждением или охлаждением наножидкостью, однако PVTAC изучены еще недостаточно хорошо. Цель данного обзора — определить, как влияют различные параметры, такие как массовый расход воздуха, конфигурация абсорбера, а также нанесение покрытий и установка остекления, на производительность PVTAC, в качестве показателя которой рассматривается эксергетическая эффективность. Обсуждаются различные области применения PVTAC. Следует отметить, что этот обзор охватывает разработки PVTAC только последних лет. Описываются достоинства и недостатки систем, а также даются рекомендации для проведения дальнейших исследований фотоэлектрических тепловых воздушных коллекторов.

**Ключевые слова:** фотоэлектрические тепловые воздушные коллекторы, PVTAC, эксергия, солнечная энергия, электрический КПД, эксергетический КПД

**DOI:** 10.56304/S004036362570095X

В связи с обострением проблем изменения климата и необходимостью в устойчивых энергетических системах фотоэлектрические технологии становятся все более актуальными. Поскольку глобальная энергетическая парадигма все больше смещается в сторону возобновляемых источников энергии, актуальность систем, созданных на основе этих источников, относительно их воздействия на окружающую среду становится все более выраженной [1–5]. Хотя фотоэлектрические (PV — от англ. photovoltaic) системы оказались новаторскими в использовании солнечной энергии для производства электроэнергии, существуют некоторые ограничения для их применения. Фотоэлектрические, или солнечные, элементы (СЭ) классифицируются на перовскитные и многопереходные. Перовскитные солнечные элементы имеют преимущество перед элементами других типов благодаря возможности их применения в различных областях и низким затратам на их производство, однако они обладают не-

большим коэффициентом преобразования солнечной энергии в электрическую. Значительная часть солнечной энергии теряется в виде тепла, и только 15–25% энергии преобразуется в электричество [6–9]. Многопереходные солнечные элементы состоят из нескольких слоев полупроводников для поглощения солнечного света каждым слоем определенной длины волны. Несмотря на то что эти элементы имеют значительный коэффициент преобразования солнечной энергии (от 25.0 до 47.6%) [10–13], высокая стоимость и чувствительность к рабочим температурам ограничивают их широкое применение. Многопереходные солнечные элементы используются, в основном, в коммерческих и космических приложениях [14].

Следует отметить, что производительность фотоэлектрических систем при высоких температурах часто снижается, и это становится существенной проблемой при их использовании в теплом климате [15]. Кроме того, для их установки

требуется значительное пространство [16], что затрудняет их размещение в густонаселенных районах. Фотоэлектрические системы являются одноцелевыми, т.е. вырабатывают исключительно электроэнергию и не производят тепловую. Для устранения этих ограничений авторы [17] в 1978 г. впервые представили фотоэлектрические тепловые системы (PVT). Эти системы более производительны, чем обычные PV-системы, поскольку они вырабатывают как электрическую, так и тепловую энергию с одной и той же площади поверхности, что приводит к более высокому значению общего коэффициента использования энергии [18]. Благодаря двойной функциональности систем PVT пространство для их размещения сокращается, что делает их привлекательным вариантом для использования в городах [19]. Тепловой компонент, входящий в состав PVT-систем, охлаждает фотоэлектрические элементы, что уменьшает потери эффективности системы из-за их (элементов) перегрева [20]. При использовании PVT-систем удовлетворяются потребности как в электрической, так и в тепловой энергии, а также уменьшается негативное воздействие на окружающую среду и снижаются затраты на производство энергии благодаря повышенной эффективности этих систем [21]. Таким образом, PVT-системы представляют собой комплексное и эффективное решение, при их применении устраняются многие ограничения, присущие автономным PV-системам.

Система PV преобразуется в PVT путем встраивания в нее теплового коллектора с охлаждающей жидкостью. Эта жидкость поглощает избыточное тепло, тем самым снижая температуру модуля PV, а нагретая жидкость направляется на отопление зданий, опреснение, аккумулирование тепла, производство электроэнергии, сушку продукции и пр. [22–26]. Классификация систем PVT (коллекторов) представлена на рис. 1. Первоначально эти системы разделяли на два типа в зависимости от используемого теплоносителя – воздуха или воды [17]. Позже PVT-системы были разделены на три типа: с применением воздуха, воды и наножидкости.

Фотоэлектрический тепловой воздушный коллектор (PVTAC) представляет собой PVT с воздушным охлаждением, в котором воздух проходит через воздуховод, расположенный на задней стороне панели PV. Поток воздуха может двигаться под действием либо естественной, либо вынужденной конвекции. PVTAC обычно состоит из панели PV, системы воздуховодов и теплообменника. На рис. 2 показан принцип работы PVTAC.

Автор [27] исследовал PVTAC четырех конфигураций (рис. 3). Он показал, что производительность коллектора конфигурации I (воздух

движется над абсорбером – абсорбирующей пластиной) была самой низкой, в то время как конфигурация III (однопроходной поток воздуха протекает по обеим сторонам абсорбера) оказалась самой эффективной, поскольку для обеспечения принудительной конвекции воздуха требовалась наименьшая из всех конфигураций мощность вентилятора. Производительность коллекторов четырех конфигураций изучалась путем изменения массового расхода воздуха. Максимальная эффективность коллектора конфигурации III наблюдалась при массовой скорости воздуха  $0.04 \text{ кг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ .

В [28] проведено экспериментальное исследование потока в PVTAC с оребренной задней стенкой и тонким металлическим листом, расположенным в средней части воздушного канала. Был сделан вывод, что максимальной эффективности PVTAC 60–62% можно достичь, если оребренную заднюю стенку изготовить из стекла. Авторы сопоставили экспериментальные и теоретические данные, а также изучили влияние массового расхода воздуха, его температуры на входе в коллектор и угла наклона коллектора на производительность PVTAC-системы.

Авторы [29] определили тепловую и электрическую эффективность плоского PVTAC, а также его эксергетическую производительность. Общая энергоэффективность, как отметили авторы, составила 45% при конкретных климатических условиях и параметрах конструкции. Важный вывод, к которому они пришли в результате выполнения этого исследования, – эффективность PVTAC снижается при повышении температуры воздуха на входе или при увеличении длины воздуховода.

В [30] проведено сравнение производительности однопроходного и двухпроходного PVTAC и подтверждено, что двухпроходная система более эффективна, чем однопроходная, благодаря более интенсивному отводу тепла. Кроме того, авторы установили, что при увеличении массового расхода теплоносителя сверх оптимального значения тепловой КПД системы снижается.

Авторы [31] предприняли попытку оценить тепловые характеристики гибридного PVTAC. Чтобы сопоставить коллекторы по производительности, они рассматривали PV-модули двух типов, а именно фотоэлектрические модули с покрытием стекло – стекло и стекло – тефлар<sup>1</sup>. В первом случае солнечное излучение поглощается солнечными элементами (СЭ) и абсорбером (зачерненная металлическая пластина). Воздух нагревается теплом, отдаваемым черной пластиной, и теплом, передаваемым от солнечного элемента

<sup>1</sup> Tedlar – торговая марка поливинилфторида (ПВФ), принадлежащая компании DuPont (США).

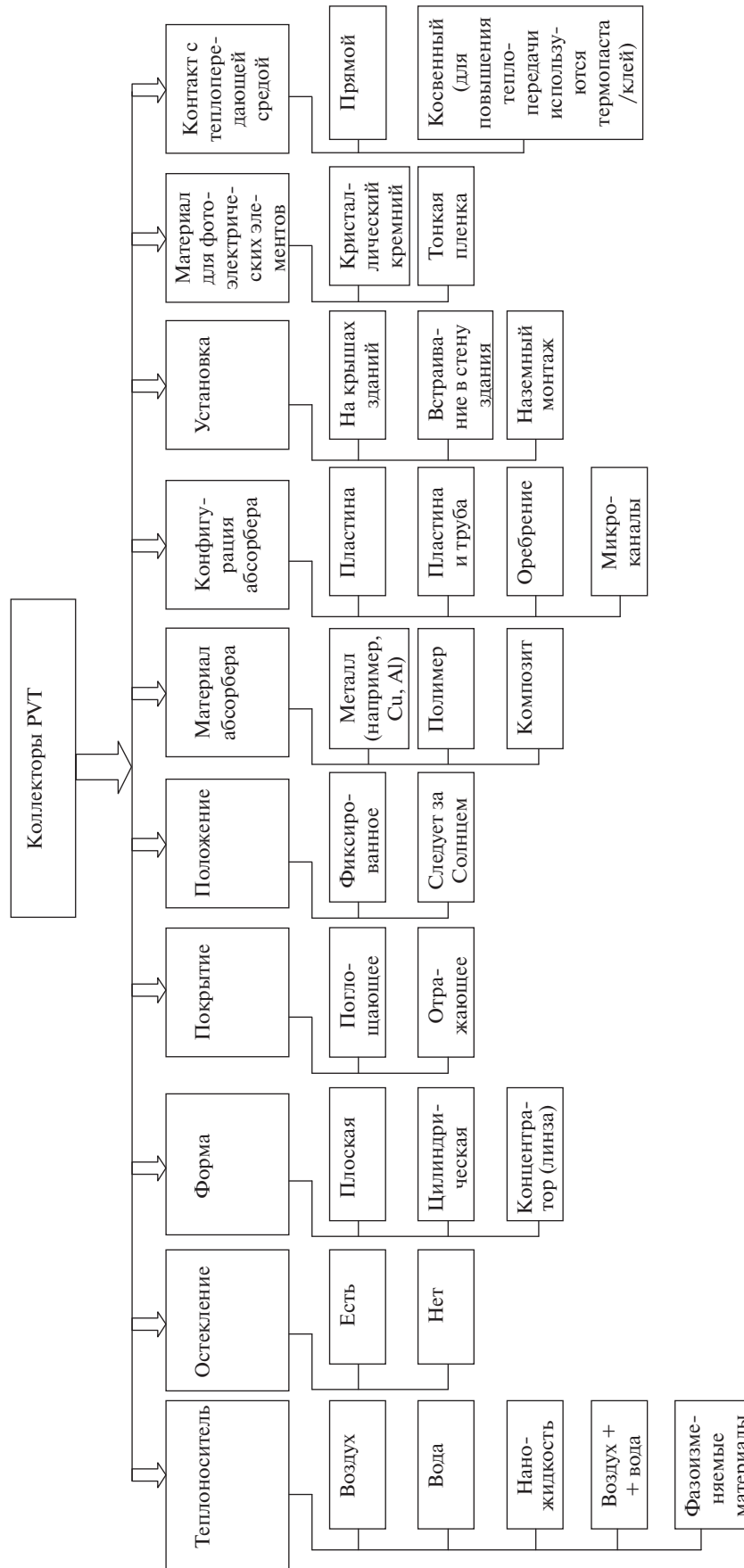


Рис. 1. Классификация коллекторов РVТ

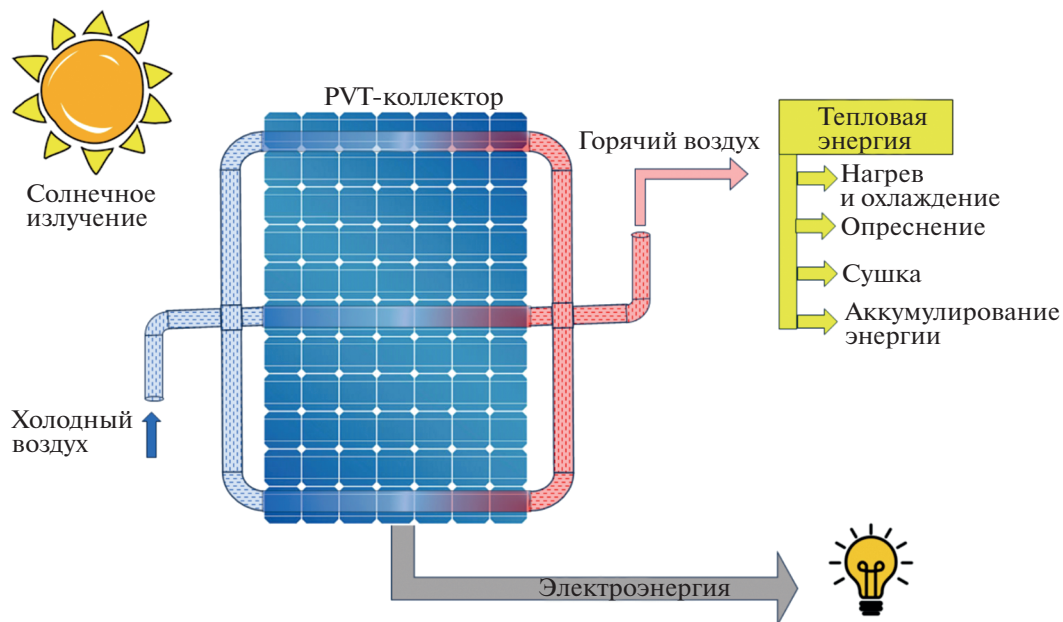


Рис. 2. Принцип работы PVTAC

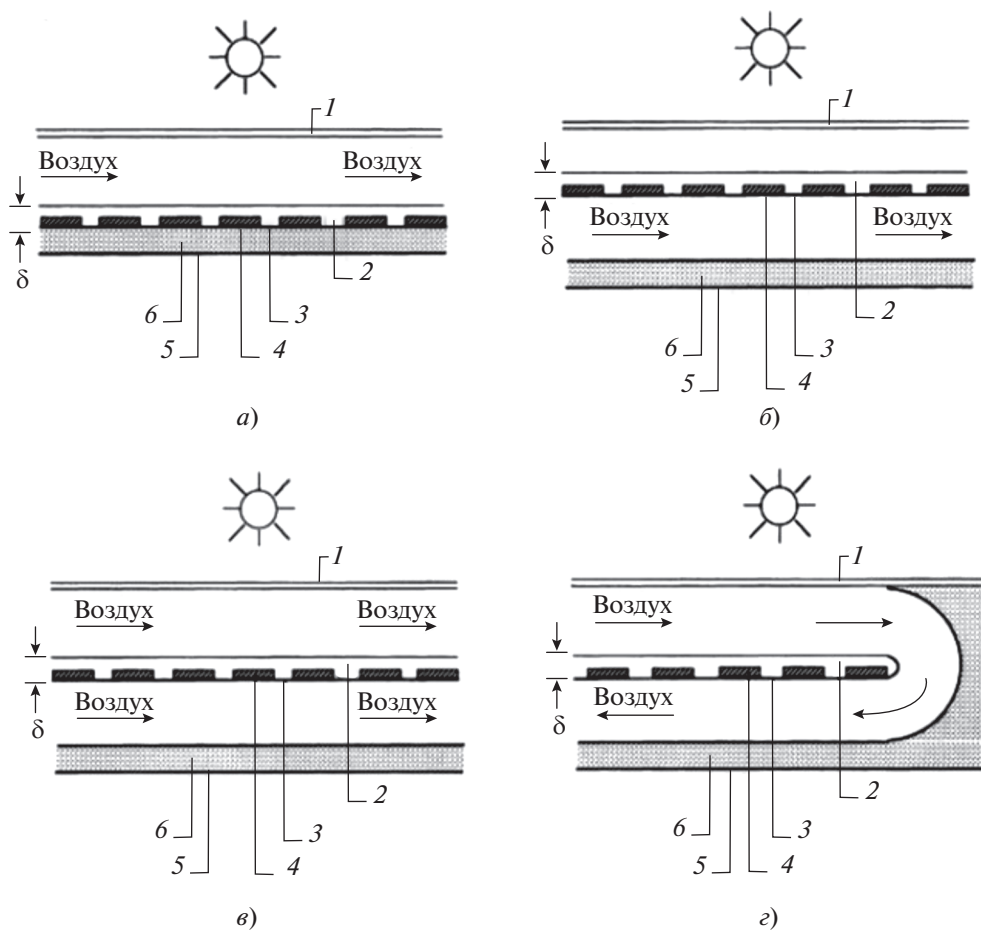


Рис. 3. Конфигурации PVTAC [27].

*a* – воздух движется над абсорбирующей пластиной (конфигурация I); *б* – воздух движется под абсорбирующей пластиной (конфигурация II); *в* – воздух движется над и под абсорбирующей пластиной (конфигурация III); *г* – петлевой поток воздуха над и под абсорбирующей пластиной (конфигурация IV).

*1* – стеклянное покрытие; *2* – зазор; *3* – абсорбер; *4* – фотоэлектрическая ячейка; *5* – задняя пластина; *6* – изоляция;  $\delta$  – толщина PV-панели

через стеклянную крышку, расположенную под ним. Во втором случае солнечное излучение поглощается СЭ и EVA<sup>2</sup>, затем передается к основанию из тедлара для нагрева воздуха, проходящего под ним. Отмечено, что гибридный воздушный коллектор с фотоэлектрическим модулем стекло — стекло имеет более высокую тепловую эффективность, чем PV-модуль стекло — тедлар.

Исследование коллекторов различных конфигураций, а именно остекленных, неостекленных, с покрытием из тедлара и без него, было проведено в [32]. Был сделан вывод, что наилучшая производительность у остекленного PVTAC без тедлара. Авторы [33] провели исследование двухпроходной системы PVT, скорость теплопередачи и, следовательно, эффективность которой были повышены благодаря оребрению. Было обнаружено, что интеграция ребер в систему значительно снижает ее температуру, повышая тем самым ее производительность.

Система PVTAC имеет следующие преимущества перед PVT-системами других типов:

обладает сравнительно небольшой массой, поскольку в качестве хладагента в ней используется воздух; это, кроме того, существенно упрощает ее монтаж [34];

экономически эффективна, поскольку потребность в материалах снижена по сравнению с коллекторами, работающими на воде или наножидкости [35];

процесс производства компонентов, входящих в состав PVTAC, значительно проще [35];

техническое обслуживание не вызывает проблем;

срок окупаемости небольшой по сравнению с водяными коллекторами [36].

Однако существуют и определенные ограничения в использовании PVTAC:

производительность PVTAC меньше, чем PVT с водяным/наножидкостным охлаждением, поскольку теплофизические свойства воздуха, такие как теплоемкость и теплопроводность, намного ниже, чем у воды [37, 38].

колебания температуры, которые обусловлены интенсивностью солнечного излучения, намного более существенные в PVTAC по сравнению с жидкостным коллектором [39].

Несмотря на эти ограничения, преимущества PVTAC очевидны. Существует дефицит литературных источников, посвященных изучению систем PVTAC, поскольку большее внимание уделяется системам на основе воды или наножидкости. Од-

нако доступность воздуха и простой монтаж делают PVTAC привлекательным вариантом для удовлетворения потребностей как в электрической, так и в тепловой энергии. Насколько известно авторам, в последние годы никаких значительных исследований, которые фокусировались бы на способах повышения производительности PVTAC, не проводилось. Целью данного обзора является изучение последних разработок, направленных на более эффективное использование PVTAC. Также проведен краткий обзор различных направлений применения PVTAC.

### ПОСЛЕДНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ ФАКТОРОВ, СПОСОБСТВУЮЩИХ ПОВЫШЕНИЮ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ PVTAC С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО КПД

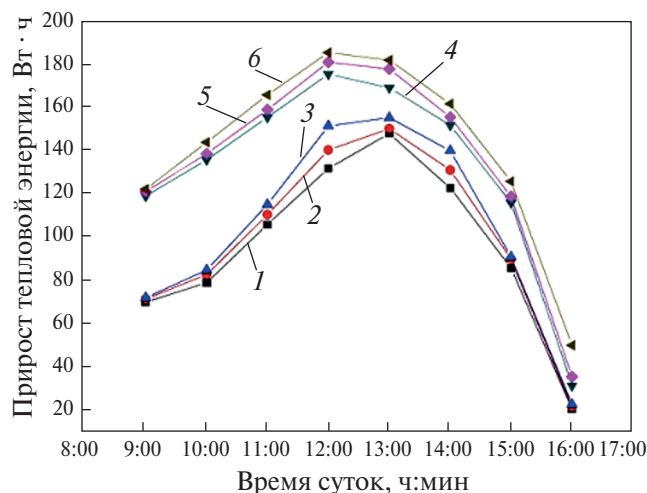
В нескольких исследовательских работах сообщалось о методах повышения эффективности коллекторов PVTAC. Часть широко используемых методов базируется на варьировании различных параметров, таких как массовый расход (MFR — от англ. mass flow rate) теплоносителя, конфигурация абсорбера, остекление, размеры канала охлаждающей жидкости и т.д. Влияние некоторых из основных параметров рассматривается далее.

#### *Влияние массового расхода*

Авторы [40] провели теоретическое исследование PVTAC при трех значениях MFR: 0.007, 0.0097 и 0.0128 кг/с — для типичного дня в декабре и марте. Они подробно проанализировали влияние MFR на различные параметры, такие как температуры солнечного элемента, задней поверхности, воздуха, выходящего из коллектора, а также приросты тепловой энергии и эксергии. Был сделан вывод, что температура воздуха на выходе, приросты тепловой энергии и эксергии повышаются при увеличении MFR (рис. 4). Для типичного дня декабря при массовом расходе воздуха 0.0128 кг/с максимальные приросты тепловой энергии и эксергии в 12:00 составили 152 и 7.88 Вт · ч соответственно, а для типичного дня марта в это же время — 185.15 Вт · ч и 17.82 Вт · ч соответственно.

В [41] выполнен теоретический и экспериментальный анализ PVTAC в стационарном состоянии. Исследования проведены при изменении MFR от 0.007 до 0.07 кг/с, плотность теплового потока, полученная в результате солнечного излучения, варьировалась от 385 до 820 Вт/м<sup>2</sup>. Было установлено, что энергоэффективность PVTAC повышалась при увеличении MFR. Теоретиче-

<sup>2</sup> EVA, или этиленвинилацетат, — современный полимер, состоящий из этилена, винилацетата и небольшого количества добавок, имеющий уникальные свойства, универсальный, многоцелевого применения.



**Рис. 4.** Приросты тепловой энергии в разные часы суток, полученные в декабре (1–3) и марте (4–6) [40]. Массовый расход воздуха, кг/с: 1, 4 – 0.007; 2, 5 – 0.0097; 3, 6 – 0.0128

ские результаты удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными (рис. 5).

Авторы [42] численно и экспериментально проанализировали работу PVTAC. Для прогнозирования температуры поверхности фотоэлектрического модуля использовалась программа ANSYS. Эксперименты проводились при двух значениях MFR: 0.031087 и 0.04553 кг/с. Эксергический КПД  $\eta_{ex}$  составил при этих расходах 17.12 и 18.71% соответственно, что свидетельствует о том, что эксергический КПД возрастает с увеличением MFR. В [42] также сообщается, что при повышении MFR температура поверхности коллектора значительно снижается, а общая эффективность системы увеличивается на 0.42% (рис. 6).

В исследовании [43] представлена разработанная авторами вертикальная гибридная солнечная сушилка PVTAC. Эксперименты проводились

при трех значениях MFR: 0.010, 0.012 и 0.014 кг/с. Для улучшения теплопередачи над пластиной абсорбера и панелью PVTAC были установлены ребра. Результаты экспериментов показали, что при увеличении MFR значительно сокращается время сушки (рис. 7). Кроме того, после установки ребер существенно повысилась производительность системы.

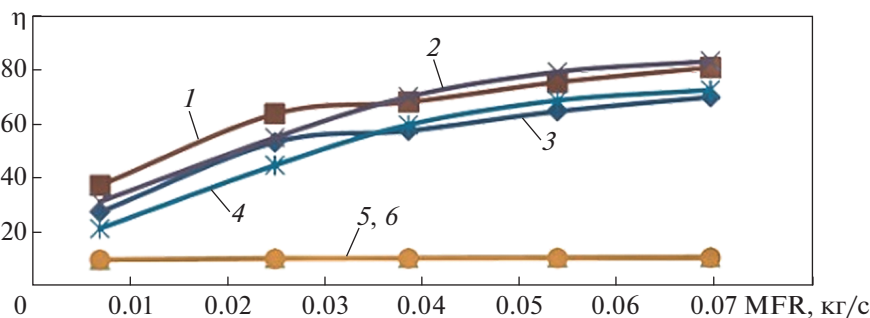
Авторы [44] экспериментально исследовали и сравнили PVTAC трех различных типов, а именно обычный PVT, с парафиновым накопителем тепловой энергии, а также с аккумулятором тепла на основе парафина, обогащенного наночастицами оксида меди. Испытания проводились при двух значениях MFR: 0.007 и 0.014 кг/с. Результаты экспериментов показали, что обогащенная наночастицами система PVT имела максимальный общий эксергический КПД, равный 15.44%.

В табл. 1 сведены основные экспериментальные результаты по исследованию влияния MFR на производительность PVTAC.

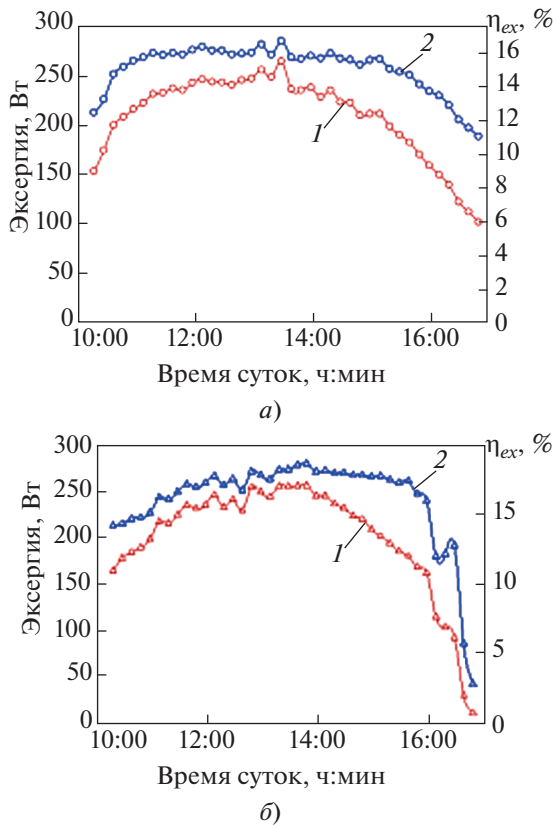
#### *Влияние конфигурации абсорбера на эффективность PVTAC*

В [41] проведен теоретический и экспериментальный анализ стационарного состояния PVTAC, абсорбер которого состоял из V-канавок (рис. 8, а). Канавки такой формы были предложены вместо обычных V-канавок, применявшихся в работе [45]. Преимущество V-канавок состояло в том, что они создавали большую площадь поверхности теплопередачи и тем самым повышали производительность коллектора. Средний КПД системы с V-канавками составлял 47.10%, тогда как при использовании V-канавок этот показатель увеличился до 57.5–64.6%.

Автор [46] разработал PVTAC, в котором воздух пропускается через текстильную ткань, размещенную диагонально внутри коробки коллектора. Эксергический КПД такого PVTAC составил 41%. Также было высказано предположение, что диа-



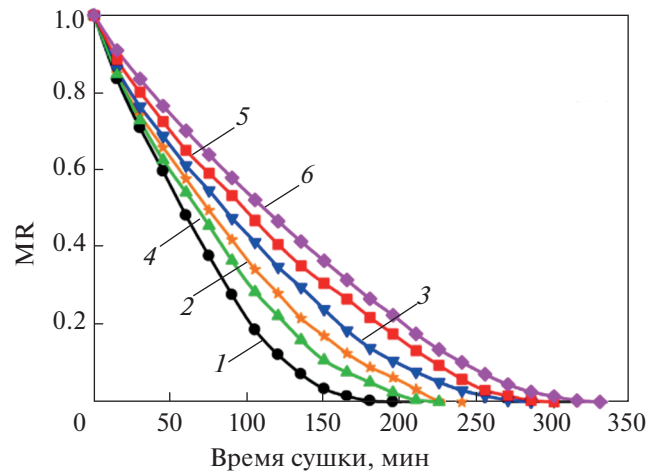
**Рис. 5.** Зависимость КПД PVTAC  $\eta$  от массового расхода теплоносителя MFR [41]. Общий энергетический КПД, %: 1 – расчет; 2 – эксперимент; тепловой КПД, %: 3 – расчет; 4 – эксперимент; электрический КПД, %: 5 – расчет; 6 – эксперимент



**Рис. 6.** Зависимости получаемой эксергии (1) и эксергетического КПД (2) от времени суток [42].  
Массовый расход теплоносителя, кг/с: а – 0.031087; б – 0.04553

гонально расположенные текстильные ткани обеспечивают лучшую производительность системы.

В экспериментальном исследовании [47] проведен анализ эксергетических характеристик пластин абсорбера с различным расположением (линейным и шахматным) ребер-турбулизаторов. Основная цель этого исследования – сравнить обычный солнечный коллектор (с плоским абсорбером) с теми коллекторами, абсорберы кото-



**Рис. 7.** Зависимость времени сушки продукта от массового расхода теплоносителя [43].  
MFR, кг/с: 1, 4 – 0.014; 2, 5 – 0.012; 3, 6 – 0.010; 1, 2, 3 – PVTAC с ребрами; 4, 5, 6 – PVTAC без ребрения

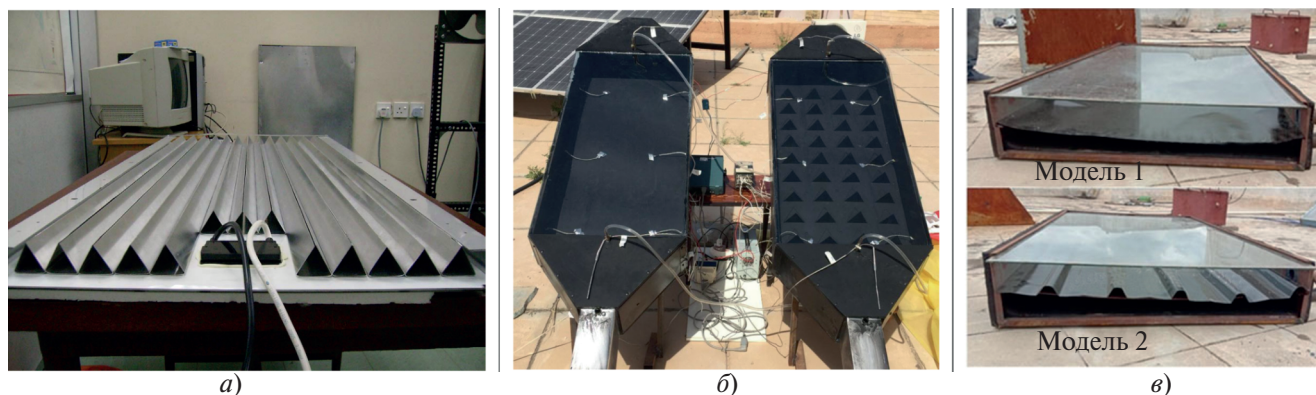
рых оснащены турбулизаторами. На рис. 8, б показаны плоский абсорбер и абсорбер с линейным расположением ребер. Максимальный эксергетический КПД был зарегистрирован у PVTAC, поглощающая поверхность которого была снабжена турбулизаторами, расположенными с наклоном в шахматном порядке (рис. 9).

Авторы [48] провели расчеты характеристик двухходового ребренного PVTAC, абсорбер которого включал материал с фазовым переходом. Максимальный эксергетический КПД такой системы составил 2.5–4.0%.

В [49] проведено экспериментальное исследование двух моделей PVTAC. В модели 1 абсорбер представлял собой плоскую пластину, а в модели 2 он (абсорбер) имел трапециевидные канавки (рис. 8, в). Авторы сообщили о повышении эксергетического КПД модели 2 на 8.4% по сравнению с моделью 1.

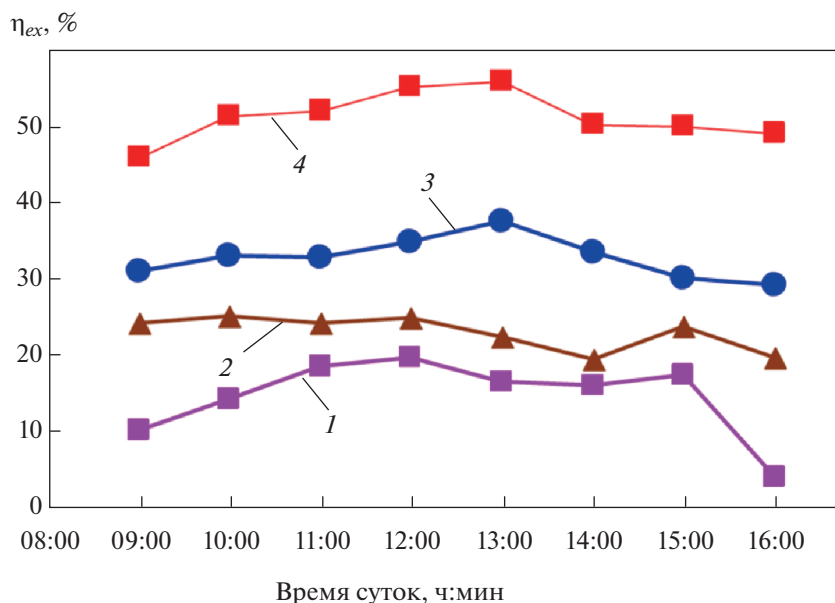
**Таблица 1.** Результаты исследований влияния массового расхода теплоносителя на производительность PVTAC

| Источ-ник | MFR, кг/с    | Площадь поверхности коллектора, м <sup>2</sup> | Размеры PVTAC, м |        | КПД, %   |               |                      |                 |
|-----------|--------------|------------------------------------------------|------------------|--------|----------|---------------|----------------------|-----------------|
|           |              |                                                | длина            | ширина | тепловой | электрический | общий энергетический | эксергетический |
| [40]      | 0.007–0.0128 | 0.754                                          | 1.1              | 0.678  | —        | —             | 94.24                | —               |
| [41]      | 0.0007–0.07  | —                                              | —                | —      | 54.50    | —             | 65.22                | 12.79           |
| [42]      | 0.03, 0.0455 | 1.56                                           | 1.6              | 0.98   | 49.50    | 13.98         | 57.07                | 17.59           |
| [43]      | 0.010–0.014  | —                                              | 0.35             | 0.35   | 71.96    | —             | —                    | 2.86            |
| [44]      | 0.007, 0.014 | —                                              | —                | —      | 69.00    | —             | —                    | 15.44           |



**Рис. 8.** Конфигурации абсорбера.

*a* – абсорбер с V-канавками [41]; *б* – плоский абсорбер (слева) и поглотитель с линейно расположенными ребрами (справа) [47]; *в* – абсорберы плоский (модель 1) и с трапециевидными канавками (модель 2) [49]



**Рис. 9.** Изменение эксергетического КПД в течение светового дня для PVTAC с ребрами-турбулизаторами при разном их расположении на абсорбере; массовый расход воздуха 0.0377 кг/с [47].

*1* – без турбулизаторов (плоский абсорбер); расположение турбулизаторов: *2* – линейное; *3* – в шахматном порядке; *4* – в шахматном порядке с наклоном

В табл. 2 представлены результаты исследований влияния конфигурации абсорбера на эффективность PVTAC, полученные различными авторами.

#### *Влияние остекления*

В работе [50] проведено исследование PVTAC стекло – стекло – тедлар с использованием модели искусственной нейронной сети. Получено, что годовой прирост эксергии составил 404.98 и 427.60 кВт · ч соответственно. В [51] выполнено численное моделирование процессов на застекленной стенке, обогреваемой солнечным

излучением (солнечная стенка). Изучено влияние объема прокачиваемого воздуха и других параметров и установлено, что эксергетический КПД предлагаемой конструкции PVTAC в 1.3 раза выше, чем у коллектора с обычной солнечной стенкой. Авторы [52] провели анализ эксергии застекленного и незастекленного PVTAC и заявили, что время сушки было значительно сокращено при использовании остекления. В [53] выполнено аналогичное исследование PVTAC с концентрированным параболическим остеклением и получено, что эксергетическая эффективность такой системы намного выше, чем у коллектора с плоским остеклением, благодаря более

Таблица 2. Результаты исследований влияния конфигурации абсорбера на эффективность PV/TAS

| Источник | Особенности абсорбера                                     | Характеристики                                   | Тепловой поток солнечного излучения, Вт/м <sup>2</sup> | Массовый расход, кг/с | КПД, %   |                      |                 |
|----------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------|----------|----------------------|-----------------|
|          |                                                           |                                                  |                                                        |                       | тепловой | общий энергетический | эксергетический |
| [41]     | V-канавка                                                 | Размеры канавки: 3.45 и 3.5 см, угол наклона 60° | 385, 820                                               | 0.007–0.07            | 54.5     | 65.22                | 12.79           |
| [46]     | Нетканый материал                                         | Диагональное расположение вдоль коллектора       | –                                                      | 0.028                 | –        | 70                   | 41              |
| [47]     | Наклонно-ступенчатый дельтовидный турбулизатор (алюминий) | Размеры абсорбера: 1000 × 500 × 1 мм             | 135                                                    | 0.0125–0.073          | –        | 65–80                | –               |
| [48]     | Ребра (алюминий) и материал с фазовым переходом (парафин) | Размеры ребра: 200 × 60 × 1 мм                   | 425–1000                                               | 0.01–0.09             | –        | 44.8–62.8            | 2.5–4.2         |
| [49]     | Абсорбер – пластина с трапецевидными канавками            | Размеры абсорбера: 2 × 1.04 × 0.004 м            | 266–941.8                                              | 0.0039–0.0156         | –        | 29.32–44.8           | 9.8             |

**Таблица 3.** Результаты исследований влияния различных типов остекления на эффективность PVTAC

| Источ-<br>ник | Тип остекления                                 | Особенности                                 | Тепловой<br>поток<br>солнечного<br>излучения,<br>Вт/м <sup>2</sup> | Массовый<br>расход/массовая<br>скорость | КПД, %      |                              |                      |
|---------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------|------------------------------|----------------------|
|               |                                                |                                             |                                                                    |                                         | тепловой    | общий<br>энергети-<br>ческий | эксергети-<br>ческий |
| [50]          | Стекло и тефлар                                | —                                           | 100–800                                                            | —                                       | —           | —                            | —                    |
| [51]          | Акриловая краска<br>(пропускание<br>более 90%) | 1300 × 600 × 5 мм                           | —                                                                  | 30–80 м <sup>3</sup> /ч                 | 64.95–70.26 | —                            | 0.69–3.63            |
| [52]          | Стекло                                         | —                                           | 500–1200                                                           | 0–1 м <sup>3</sup> /мин                 | 5–9         | —                            | 0.2–0.5              |
| [53]          | Коническое<br>конденсационное<br>покрытие      | Угол наклона<br>варьируется<br>от 15 до 75° | 250–1000                                                           | 0.01–0.15 кг/с                          | —           | —                            | —                    |
| [54]          | Линза Френеля                                  | —                                           | 450–750                                                            | 0–0.09 кг/(м <sup>2</sup> · с)          | —           | 71.8                         | —                    |

высоким рабочим температурам. Авторы [54] применили стеклянные стенки двух разных типов для PVTAC, а именно плоскую и стенку из линзы Френеля. Исследование проведено на о. Банги (Малайзия) при различных условиях эксплуатации. Установлено, что при использовании стенки из линзы Френеля эффективность составила 71%, в то время как при плоской стеклянной стенке эффективность не превышала 54%.

В табл. 3 представлены результаты исследований влияния разных типов остекления на эффективность PVTAC.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ PVTAC В РАЗЛИЧНЫХ ЦЕЛЯХ

Воздушные коллекторы PVT широко применяются в различных целях: для отопления и охлаждения помещений, для сушки урожая в сельском хозяйстве, опреснения воды, аккумуляции тепла и выработки электроэнергии. Независимо от сферы применения таких фотоэлектрических устройств анализ эксергии является важным фактором при проектировании коллектора PVTAC. На рис. 10 дана подробная классификация различных приложений, в которых может использоваться система PVTAC. Далее рассматриваются некоторые важные области применения воздушных коллекторов, описанные в литературе за последние годы.

#### Сушка

Авторы [55] предложили гибридную смешанную тепличную солнечную сушилку, частично покрытую солнечными воздушными коллекторами N-PVT (N — количество коллекторов), и оценили параметры ее производительности для климатических условий Нью-Дели (Индия). В

процессе исследования они обнаружили, что при увеличении числа коллекторов с одного до пяти температура воздуха на выходе из коллектора повышается с 29 до 122.78°C, а температура в помещении теплицы — с 22.44 до 87.42°C. Также было установлено, что увеличивается количество получаемой тепловой и электрической энергии. Однако было отмечено, что при повышении массового расхода воздуха и числа коллекторов эксергетический КПД системы снижается.

В [26] предложена система сушки древесины и с помощью экспериментальных данных подтверждено ее успешное функционирование. При увеличении массового расхода температура выходящего из коллектора воздуха значительно снижалась. Кроме того, при использовании интегрированной системы рекуперации тепла (HRS — от англ. heat recovery system) время сушки сократилось до 22 и 66.3 дней летом и зимой соответственно. Результаты опытной эксплуатации показали, что, применяя такую систему сушки эффективность обычных сушилок можно существенно повысить, при этом ежегодные выбросы CO<sub>2</sub> сократятся на 78.5%.

Авторы [56] исследовали с помощью CFD-анализа два PVTAC: обычный и модифицированный, в котором использовались рифленый абсорбер, сферические турбулизаторы и перегородки. После того как модифицированный PVTAC поместили в сушильную камеру, температура на выходе из нее увеличилась примерно на 16%, следовательно, сушильная способность такой системы улучшилась. Эксперименты показали, что средний эксергетический КПД сушильной камеры находился в диапазоне 59.16–68.31%.

В [43] была разработана и исследована вертикальная гибридная солнечная сушилка с PVTAC с

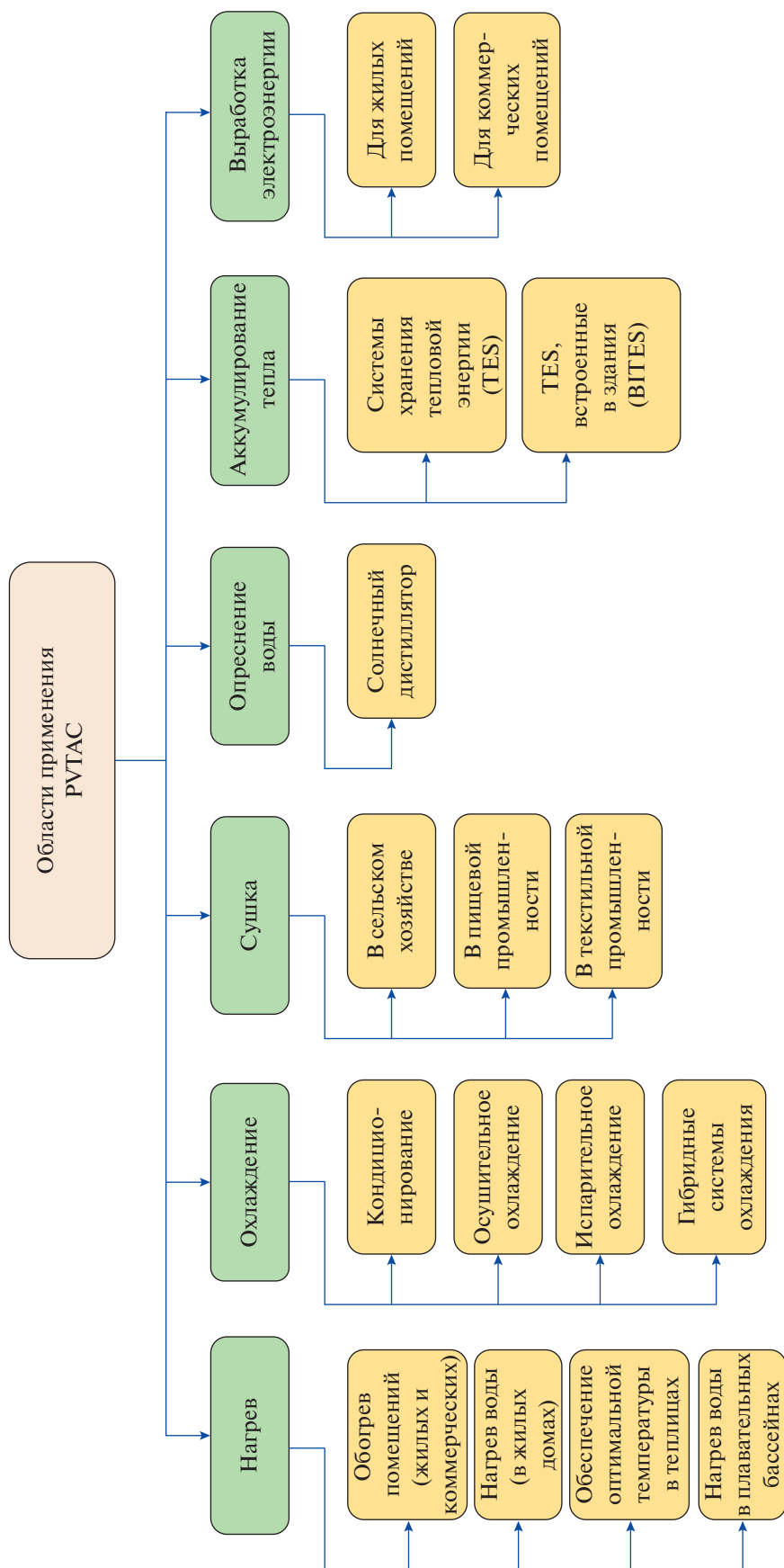


Рис. 10. Области применения PV/TAS

ребрами, расположенными над пластиной абсорбера.

Основная цель [57] — повышение производительности PVTAC путем использования встроенного блока накопления тепловой энергии с наночастицами оксида алюминия Ne-TESU (от англ. nano-embedded thermal energy storage). Разработанный коллектор был испытан в сушильной камере при двух значениях массового расхода теплоносителя. При увеличенном его расходе в сочетании с интеграцией наночастиц в блок накопления тепловой энергии общий эксергетический КПД PVTAC повысился на 28.58%. Как показали результаты экспериментов, при больших массовых расходах производительность сушилки увеличилась, а время сушки сократилось на 15–22%. Кроме того, применение наночастиц привело к повышению общей энергетической эффективности PVTAC примерно на 7%.

Авторы [58] разработали систему для сушки чая с PVTAC, в которой используется естественная и принудительная конвекция воздуха как при непрямой, так и при смешанной сушке. В первом случае сушка осуществляется только нагретым воздухом, а во втором — нагретым воздухом и вентиляторами. Содержание влаги (отношение массы воды к массе сухого материала) снизилось с 2.95 до 0.14 во всех режимах сушки.

В табл. 4 представлен подробный перечень разных вариантов применения системы PVTAC для сушки различной продукции.

#### *Отопление и охлаждение*

Авторы [59] провели многоцелевую оптимизацию солнечного воздушонагревателя (SAH — от англ. solar air heater) с коллектором PVT с целью получить максимальный прирост тепловой и электрической энергии. Для оптимизации они использовали метод Тагучи с дисперсионным анализом (ANOVA). Авторы проанализировали несколько конструкций PVT-SAH (две базовые и одну оптимальную) и установили, что при использовании оптимальной конструкции генерируется полезной тепловой и электрической энергии соответственно на 24.7 и 126% больше по сравнению с базовыми конструкциями.

В [60] была исследована система PVT для отопления и охлаждения офисных зданий, расположенных в трех различных климатических зонах. Был выполнен параметрический расчет предлагаемой системы и проведена ее оптимизация. Авторы [61] предложили двухфункциональный коллектор, с помощью которого можно получать тепло в режиме SH (от англ. solar heating) и холод в режиме RC (от англ. radiative cooling). Как показали результаты исследования, средний тепловой КПД такого коллектора в режиме SH достигает

45.88%, а его средняя охлаждающая способность составляет 36.61 Вт/м<sup>2</sup>.

В [62] представлен PVTAC, соединенный с теплообменником вода — воздух. Рассматриваемая система вырабатывает энергию, достаточную для охлаждения и нагрева воздуха в здании, благодаря ее установке снижается общее потребление энергии. Авторы сообщили, что ежедневное потребление энергии на отопление и кондиционирование снизилось на 15.30 и 24.79 кВт · ч соответственно. В [63] был исследован PVTAC для отопления помещений, было получено, что в результате его установки годовая экономия первичной энергии составила 11.0–19.7 МВт · ч (52–80%).

В табл. 5 обобщены результаты представленных работ по применению систем PVTAC в целях отопления и охлаждения зданий.

#### *Опреснение*

Автор [23] провел исследование системы опреснения воды, объединенной с концентрирующим PVTAC, и предложил математическую модель для расчета этой системы. В [64] описывается опреснительная установка, в которой нагретый в PVTAC воздух направляется в осушительное колесо. Массовый расход воздуха для обеспечения максимального коэффициента производительности (COP — от англ. coefficient of performance) системы составил 0.78 кг/с, а максимальный электрический КПД — 13.7%. В [65] рассмотрен PVTAC, объединенный с установкой увлажнения-осушения (HDH — от англ. humidification-dehumidification), работающей по замкнутому циклу. Воздух, нагретый в коллекторе, увлажнялся при распылении соленой воды, а пресную воду получали путем конденсации при охлаждении влажного воздуха в осушителе. Авторы [66] выполнили эксергоэкономическую экспертизу эжекторной установки, работающей по циклу ERC/ORC (ERC — ejector refrigeration cycle — эжекторный холодильный цикл; ORC — organic Rankine cycle — органический цикл Ренкина), совмещенной с PVTAC (солнечная сушилка) и системой опреснения обратного осмоса (RO — от англ. reverse osmosis).

В табл. 6 представлены основные характеристики систем опреснения с PVTAC.

#### *Аккумулирование тепла с использованием фазоизменяемых материалов*

Авторы [67] исследовали воздушный коллектор PVT-SAH, объединенный с системой хранения тепловой энергии на основе PCM (от англ. phase change materials). Результаты позволили сделать вывод, что один из рассматриваемых показателей производительности, а именно вклад

Таблица 4. Применение РVТАС для сушки

| Источ-ник | Исследо-мая новая система      | Рабочие параметры коллектора |           |                           | Преимущества                                                                                                                                          | Ограничения                                                      | КПД, %     |                |                       |                  | Примене-ние     |
|-----------|--------------------------------|------------------------------|-----------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------|----------------|-----------------------|------------------|-----------------|
|           |                                | температура, °С              |           | массовый расход/ скорость |                                                                                                                                                       |                                                                  | тепловой   | электри-ческий | общий энергетиче-ский | эксергети-ческий |                 |
|           |                                | на входе/охлажда-ющей среды  | на выходе |                           |                                                                                                                                                       |                                                                  |            |                |                       |                  |                 |
| [55]      | PV/TAC с N-PVT                 | 8.8/21.6                     | 29–123    | 0.01–0.05 кг/с            | Температура в теплице повышается при увеличении числа коллекторов                                                                                     | Эксергетиче-ский КПД снижается при увеличении числа коллекто-ров | 9.75–27.37 | –              | –                     | 6.77–17          | Сушка урожая    |
| [26]      | PV/TAC с HRS                   | –                            | 15–46.5   | 0.6–3.6 м/с               | Включение HRS в схему сушки сокращает время сушки древе-сины до 24.5 и 40% при двух значениях КПД рекуперации $\eta_{HRS} = 0.5$ и 0.8 соответственно | Время сушки увеличивается зимой                                  | 52.5       | –              | –                     | 59.16–68.31      | Сушка древесины |
| [56]      | PV/TAC с рифле-ным абсорбе-ром | –                            | –         | –                         | Использование рифленого абсорбера сокра-щает время сушки                                                                                              | После захода Солнца работа невозможна                            | 61–77      | –              | –                     | 10.65–11.17      | –               |

Таблица 4. Окончание

| Источ-ник | Исследу-емая новая система                                                                   | Рабочие параметры коллектора                  |                                                             |                           | Преимущества                                                                                           | Ограничения                                              | КПД, %                                |                                       |                                         |                            | Примене-ние        |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------|--------------------|
|           |                                                                                              | температура, °С                               |                                                             | массовый расход/ скорость |                                                                                                        |                                                          | тепловой                              | электри-ческий                        | общий энергетический                    | эксергети-ческий           |                    |
|           |                                                                                              | на входе/ окружающей среды                    | на выходе                                                   |                           |                                                                                                        |                                                          |                                       |                                       |                                         |                            |                    |
| [43]      | РVТАС, встроен-ный в вер-тикальную солнеч-ную сушилку                                        | 23/31                                         | —                                                           | 0.010—0.014 кг/с          | Вертикальная сушилка позво-ляет сэкономить пространство; использование ребер сокращает время сушки     | Ограниченный диапазон усло-вий эксплуата-ции             | 47.46—58.16                           | 3.41—3.67                             | —                                       | 2.32—2.86                  | Сушка листьев мяты |
| [57]      | РVТАС с блоком накопле-ния теп-ловой энергии с наноча-стицами Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 31.8/32                                       | 54.4                                                        | 0.007, 0.014 кг/с         | Наночастицы Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> позволили увеличить коли-чество получаемой тепловой энергии | Эксперимен-тально не под-тверждено                       | 69.9 (высокий MFR), 48.9 (низкий MFR) | 13.7 (высокий MFR), 11.8 (низкий MFR) | 78.11 (высокий MFR), 59.62 (низкий MFR) | —                          | Сушка фруктов      |
| [58]      | РVТАС с естествен-ной и прину-дительной конвек-цией воз-духа                                 | 30.5 солнеч-ный день), 26.08 (облач-ный день) | 45.47—87.45 (солнеч-ный день); 38.13—71.73 (облач-ный день) | 0.096, 0.0144 м/с         | В смешанном режиме было достигнуто минимальное время сушки                                             | Работа системы различается при разных погод-ных условиях | 10.40—36.0                            | 13.63—13.84                           | 45.56—72.42                             | 32.99—53.08 (для сушиллки) | Сушка зеленого чая |

Таблица 5. Применение РVТАС в целях отопления и охлаждения

| Источ-<br>ник | Исследуемая новая<br>система                                         | Рабочие параметры коллектора     |           |                                         | Преимущества                                                                                                              | Ограничения                                                                                                   | КПД, %    |               |
|---------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------------|
|               |                                                                      | температура, °C                  |           | массовый<br>расход/массовая<br>скорость |                                                                                                                           |                                                                                                               | тепловой  | электрический |
|               |                                                                      | на входе/<br>окружающей<br>среды | на выходе |                                         |                                                                                                                           |                                                                                                               |           |               |
| [59]          | PVT-SAH                                                              | 28.7                             | 115       | 5–30 кг/(м <sup>2</sup> · ч)            | Значительное увеличе-<br>ние количества<br>получаемой полезной<br>энергии                                                 | Одно климатическое<br>условие                                                                                 | 48.8–56.5 | 7.70–8.34     |
| [60]          | Реверсивный насос<br>воздух — вода как<br>источник тепла и<br>холода | 32                               | —         | —                                       | Система охлаждения<br>активируется ночью<br>для повышения<br>эффективности<br>системы                                     | Ограниченное снаб-<br>жение электроэнер-<br>гией даже при<br>больших площадях<br>поверхности коллек-<br>торов | —         | —             |
| [61]          | PVTAC-SH-RC                                                          | 30–35                            | 33–60     | 0.01–0.03 кг/с                          | Обеспечивает одно-<br>временное отопление<br>и охлаждение                                                                 | Ограничения по<br>местоположению и<br>используемым мате-<br>риалам                                            | 45.88     | —             |
| [62]          | PVTAC в сочетании<br>с теплообменником<br>вода — воздух              | 15                               | 20        | 0.05–0.50 кг/с                          | Минимизированы<br>выбросы парниковых<br>газов. Требуется<br>меньшая площадь<br>благодаря теплооб-<br>меннику вода —воздух | Несоответствие<br>между теплоприто-<br>ком и потребностью в<br>тепле                                          | —         | 13.5–14.75    |
| [63]          | Экономичная система<br>отвода тепла из поме-<br>щения                | —                                | 30–34     | 0.0123, 0.0523 кг/с                     | Снижение расхода<br>энергии на 50–80%.<br>Сокращенный срок<br>окупаемости (3–5 лет)                                       | Не реализованы алго-<br>ритмы оптимизации,<br>которые могли бы еще<br>больше улучшить<br>предлагаемую систему | 25.8–31.5 | —             |

Таблица 6. Использование RVTAS для опреснения морской воды

| Источник | Исследуемая новая система                                                       | Рабочие параметры коллектора |          |                       |                                                                                                  | Преимущества                                                                       | Ограничения | КПД, %        |                 |  |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------|---------------|-----------------|--|
|          |                                                                                 | температура, °С              |          | массовый расход, кг/с | тепловой                                                                                         |                                                                                    |             | электрический | эксперти-ческий |  |
|          |                                                                                 | морской воды                 | на входе |                       |                                                                                                  |                                                                                    |             |               |                 |  |
|          |                                                                                 |                              |          |                       |                                                                                                  |                                                                                    |             |               |                 |  |
| [23]     | Система опреснения воды, объединенная с концентрирующим PVТАС                   | 30–50                        | –        | –                     | Предотвращается образование накипи. Снижение затрат на техническое обслуживание                  | Заложенное в рас-четы предположение о стабильной работе. Высокая стоимость системы | –           | –             | 10–15           |  |
| [64]     | Установка, в которой нагретый в PVТАС воздух направляется в осушительное колесо | –                            | 31.5–33  | 0.02–0.78             | Обеспечение кондици-онирования воздуха и производства пресной воды                               | Экспериментальная проверка не проводи-лась                                         | 30–70       | 14–16         | –               |  |
| [65]     | PVТАС соединен с HDH-установкой, работающей по замкнутому циклу                 | 26–39                        | 30–45    | –                     | Повышение электри-ческого КПД на 20%                                                             | Рабочие параметры не оптимизированы                                                | 38          | –             | –               |  |
| [66]     | PVТАС интегриро-ван с подсистемой опреснения RO                                 | –                            | –        | –                     | Производство дистил-лированной воды, а также побочных про-дуктов Н <sub>2</sub> и О <sub>2</sub> | Zero-моделирование не позволяет полно-стью описать всю сложную систему             | –           | –             | 3               |  |

Таблица 7. Применение фазоизменяемых материалов в РВТАС для накопления тепловой энергии

| Источник | Исследуемая новая система          | Рабочие параметры коллектора |          |                | Преимущества                                                                                     | Ограничения                                                                                                           | КПД, %    |               |                 |
|----------|------------------------------------|------------------------------|----------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------------|-----------------|
|          |                                    | температура, °С              | расход   |                |                                                                                                  |                                                                                                                       | тепловой  | электрический | эксергетический |
|          |                                    |                              |          |                |                                                                                                  |                                                                                                                       |           |               |                 |
|          |                                    |                              |          |                |                                                                                                  |                                                                                                                       |           |               |                 |
| [67]     | PVT-SAN с РСМ                      | 20–35                        | 85.6–100 | 500–1000 кг/ч  | Производительность системы оценена при ее применении в различных климатических условиях          | Использование ограниченного числа параметров: массового расхода, толщины воздушного зазора, типа используемого РСМ    | –         | –             | –               |
| [68]     | PVTAC-PCM                          | 20–30                        | 25–35    | 0.05 кг/с      | Возможность изучения воздействия системы на окружающую среду и факторов ценообразования углерода | Установка RTHC25 не подходит для использования при низком уровне солнечного излучения. Большие эксергетические потери | 25–33     | 8–11          | 13–17           |
| [24]     | PVTAC-PCM                          | 30–40                        | 43–50    | –              | Высокая скрытая теплоемкость РСМ способствует лучшему сохранению тепла                           | Высокая стоимость РСМ на основе гидрата соли                                                                          | –         | 11.5          | –               |
| [70]     | PVTAC-TES с РСМ                    | 7–22                         | 8–35     | 0.05–0.29 м³/с | Повышенная эффективность системы и возможность накопления тепловой энергии                       | PCM с низкой температурой плавления (22°C) не подходит для использования в жарком климате                             | 12.1–42.5 | 7.9–10.8      | –               |
| [71]     | PVTAC-PCM с металлическими ребрами | 20                           | 26–45    | 15–20 л/с      | Повышенный электрический КПД обеспечивается благодаря использованию специфического PCM           | Небольшая скорость теплопередачи из-за низкой теплопроводности PCM [0.54 Вт/(м · К)]                                  | –         | –             | –               |

Таблица 8. Выработка электроэнергии PVТАС

| Источник | Исследуемая новая система                                                           | Рабочие параметры коллектора |             |                           | Преимущества                                                                                                            | Ограничения                                                                                                   | Электрический КПД, % |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
|          |                                                                                     | температура, °С              |             | массовый расход/ скорость |                                                                                                                         |                                                                                                               |                      |
|          |                                                                                     | на входе                     | на выходе   |                           |                                                                                                                         |                                                                                                               |                      |
| [72]     | PVTAC, встроенный в здание                                                          | 20.0–27.4                    | 52.56–66.43 | 0.0156 кг/с               | Тепловая эффективность повышена путем использования остекления, состоящего из трех панелей с низкоэмиссионным покрытием | Возможность использования ограничена определенными месторасположением и климатическими условиями              | 7                    |
| [25]     | PVTAC с использованием пористых металлических материалов                            | 37                           | 69          | –                         | Исследование подтверждено экспериментально, предложенная система может использоваться и при других условиях             | Упрощенная модель со многими допущениями, такими как стационарная температура и локальное тепловое равновесие | 13                   |
| [73]     | PVTAC с плоским пластинчатым и волнистым пластинчатым коллектором (PVTACF и PVTACW) | 18–33                        | 21–42       | 1–3 м/с                   | Применение системы PVTACW эффективно для снижения выбросов CO <sub>2</sub>                                              | Отсутствует долгосрочный анализ производительности для обеспечения долговечности предлагаемой системы         | 14                   |
| [74]     | PVTAC с несколькими воздуховодами квадратного сечения                               | 27–35                        | 27–62       | 0.0235 кг/с               | PVTAC предлагаемой конструкции можно использовать для сушки, отопления зданий и электроснабжения                        | Ограниченный диапазон массового расхода теплоносителя (только 0.0235 кг/с)                                    | 14                   |
| [75]     | Использование ANN для прогнозирования эффективности PVTAC                           | 20–35                        | 33–47       | –                         | Высокая точность прогноза электрического КПД                                                                            | Экономические и экологические последствия внедрения предложенной системы не обсуждались                       | 5–12.7               |

солнечного тепла, увеличился с 82.6 до 100.0%. В [68] проведен расчет системы PVTAC-PCM, работающей в трех различных климатических условиях Мексики. Авторы применили для выбора оптимального фазоизменяемого материала классификацию Кёппена. Расчеты показали, что при использовании наилучшего фазоизменяемого материала можно снизить температуру примерно на 20%. Авторы [24] экспериментально изучили влияние PCM на систему PVTAC. В качестве фазоизменяемого материала использовали гидрат соли. Результаты показали, что при применении PCM как при естественной, так и при вынужденной конвекции воздуха температура солнечной панели значительно снижается и эффективность системы повышается.

Автор [69] выполнил с использованием программного обеспечения Fluent теоретическое исследование системы PVTAC с полимерным PCM для отопления и охлаждения зданий в Эр-Рияде (Саудовская Аравия). В [70] проведено экспериментальное исследование воздушного солнечного фотоэлектрического теплового коллектора, соединенного с централизованной системой аккумулирования тепловой энергии (TES — от англ. thermal energy storage) на основе фазоизменяемого материала, а также разработана модель для оптимизации системы PVT-PCM. Производительность системы определялась путем изменения расхода воздушного потока, наклона и ориентации коллектора. Средняя общая эффективность системы увеличилась с 37.6 до 40.2% по сравнению с базовым вариантом без оптимизации, а средний суточный коэффициент использования скрытой мощности TES повысился с 13.3 до 79.5%.

В [71] проведено экспериментальное исследование фотоэлектрического теплового коллектора с накопителем тепловой энергии для выработки электроэнергии, отопления зданий и естественной вентиляции. В качестве теплоаккумулирующей среды использовался слой PCM, интегрированный в PVTAC. Для улучшения теплопередачи в PCM в нем были установлены металлические ребра для повышения скорости вентиляции при охлаждении зданий.

В табл. 7 приведены данные по использованию PCM для накопления тепла в системах PVTAC.

#### *Выработка электроэнергии*

Авторы [72] построили прототип интегрированного в здание PVTAC для выработки тепловой и электрической энергии. Результаты испытаний показали, что электрический КПД составил 7%. В [25] предложено использовать в PVTAC пористые (вспененные) металлические материалы для охлаждения фотоэлектрических ячеек. Согласно результатам численного исследования, электриче-

ский КПД такой системы повышается на 3–4%. В [73] экспериментально исследованы PVTAC двух конфигураций: с плоским пластинчатым и волнистым пластинчатым коллектором (PVTACF и PVTACW). Электрический КПД PVTACW оказался на 0.69–0.74% выше, чем КПД PVTACF.

Авторы [74] разработали новую конструкцию PVTAC с несколькими воздуховодами квадратного сечения. Результаты численных расчетов и экспериментов позволили сделать вывод, что электрическая мощность, полученная при использовании 55 воздухопроводов, составила 121.47 Вт.

В [75] для прогнозирования электрической и тепловой эффективности PVTAC использовали модель на основе искусственной нейронной сети (ANN — от англ. artificial neural-network). Предложенная модель показала довольно высокую точность прогнозирования как электрического, так и теплового КПД: средняя абсолютная ошибка MAE (mean absolute error) составила 0.0078 и 3.3607% соответственно.

В табл. 8 представлены основные результаты применения PVTAC для выработки электроэнергии.

### ВЫВОДЫ

1. Фотоэлектрические тепловые воздушные коллекторы (PVTAC) являются эффективными альтернативными источниками энергии, как электрической, так и тепловой, при одновременной их выработке. Они универсальны и довольно просты в эксплуатации, хотя и имеют некоторые ограничения в применении.

2. На производительность PVTAC существенное влияние оказывают такие параметры, как массовый расход воздуха и конфигурация абсорбера, немаловажную роль играет также остекление. Как показали многочисленные исследования, эффективность коллектора сначала повышается при увеличении расхода теплоносителя, достигая максимального значения, а затем при его дальнейшем росте начинает снижаться. При использовании абсорберов различных конфигураций площадь поглощающей поверхности увеличивается, что также приводит к повышению эффективности PVTAC.

3. Необходимо продолжать исследования по оптимизации PVTAC с целью максимально использовать имеющийся у этих систем потенциал. Кроме того, следует провести более тщательный эксергоэкономический анализ PVTAC, поскольку работ, посвященных изучению влияния различных факторов на производительность этих устройств, в настоящее время сравнительно немного. Представленный обзор может быть использован исследователями и инженерами, занимающимися вопросами повышения эффективности фотоэлек-

трических тепловых воздушных коллекторов, как справочный материал.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Direct** hydrocarbon fuel cells: A promising technology for improving energy efficiency / H. Mohammed, A. Al-Othman, P. Nancarrow, M. Tawalbeh, M. El Haj Assad // *Energy*. 2019. V. 172. P. 207–219. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.105>
2. **Assessment** of calotropis natural dye extracts on the efficiency of dye-sensitized solar cells / A.H. Alami, K. Aokal, D. Zhang, M. Tawalbeh, A. Alhammadi, A. Taieb // *Agron. Res.* 2018. V. 16. No. 4. P. 1569–1579. <https://doi.org/10.15159/AR.18.166>
3. **Shah S.A.A.** Feasibility study of renewable energy sources for developing the hydrogen economy in Pakistan // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2020. V. 45. Is. 32. P. 15841–15854. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.153>
4. **Recent** advances and applications of solar photovoltaics and thermal technologies / L. Ahmad, N. Khordehghah, J. Malinauskaite, H. Jouhara // *Energy*. 2020. V. 207. P. 118254. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118254>
5. **A mini** review: can graphene be a novel material for perovskite solar cell applications? / E.L. Lim, C.C. Yap, M.H.H. Jumali, M.A.M. Teridi, C.H. Teh // *Nano-Micro Lett.* 2018. V. 10. No. 2. P. 27. <https://doi.org/10.1007/s40820-017-0182-0>
6. **Historical** analysis of high-efficiency, large-area solar cells: Toward upscaling of perovskite solar cells / S. Lee, S. Bae, D. Kim, H. Lee // *Adv. Mater.* 2020. V. 32. Is. 51. P. 2002202. <https://doi.org/10.1002/adma.202002202>
7. **Tailoring** in situ healing and stabilizing post-treatment agent for high-performance inverted CsPbI<sub>3</sub> perovskite solar cells with efficiency of 16.67% / S. Fu, L. Wan, W. Zhang, X. Li, W. Song, J. Fang // *ACS Energy Lett.* 2020. V. 5. Is. 10. P. 3314–3321. <https://doi.org/10.1021/acsenenergylett.0c01728>
8. **Dopant-free** organic hole-transporting material for efficient and stable inverted all-inorganic and hybrid perovskite solar cells / K. Jiang, J. Wang, F. Wu, Q. Xue, Q. Yao, J. Zhang, Yi. Chen, G. Zhang, Z. Zhu, H. Yan, L. Zhu, H.-L. Yip // *Adv. Mater.* 2020. V. 32. Is. 16. P. 1908011. <https://doi.org/10.1002/adma.201908011>
9. **Toward** the commercialization of perovskite solar modules / P. Zhu, Ch. Chen, J. Dai, Yu. Zhang, R. Mao, Sh. Chen, J. Huang, J. Zhu // *Adv. Mater.* 2024. V. 36. Is. 15. P. 2307357. <https://doi.org/10.1002/adma.202307357>
10. **Electrical** efficiency of the photovoltaic/thermal collectors cooled by nanofluids: machine learning simulation and optimization by evolutionary algorithm / Y. Cao, E. Kamrani, S. Mirzaei, A. Khandakar, B. Vaferi // *Energy Rep.* 2022. V. 8. P. 24–36. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2021.11.252>
11. **Raising** the one-sun conversion efficiency of III–V/Si solar cells to 32.8% for two junctions and 35.9% for three junctions / S. Essig, Ch. Allebé, T. Remo, J.F. Geisz, M.A. Steiner, K. Horowitz, L. Barraud, J.S. Ward, M. Schnabel, A. Descoedres, D.L. Young, M. Woodhouse, M. Despeisse, Ch. Ballif, A. Tamboli // *Nat. Energy*. 2017. V. 2. Is. 9. P. 17144. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.144>
12. **Philipps S.P., Dimroth F., Bett A.W.** High-efficiency III–V multijunction solar cells. Elsevier, 2017. P. 439–472. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809921-6.00012-4>
13. **Achievement** of more than 25% conversion efficiency with crystalline silicon heterojunction solar cell / K. Masuko, M. Shigematsu, T. Hashiguchi, D. Fujishima, M. Kai, N. Yoshimura, T. Yamaguchi, Y. Ichihashi, T. Mishima, N. Matsubara, T. Yamanishi, T. Takahama, M. Taguchi, E. Maruyama, Sh. Okamoto // *IEEE J. Photovoltaics*. 2014. V. 4. Is. 6. P. 1433–1435. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2014.2352151>
14. **High-efficiency** silicon heterojunction solar cells: Materials, devices and applications / Y. Liu, Y. Li, Yi. W, G. Yang, L. Mazzarella, P. Procel-Moya, A.C. Tamboli, K. Weber, M. Boccard, O. Isabella, X. Yang, B. Sun // *Mater. Sci. Eng.: R: Rep.* 2020. V. 142. P. 100579. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100579>
15. **Dubey S., Sarvaiya J. N., Seshadri B.** Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world – A review // *Energy Procedia*. 2013. V. 33. P. 311–321. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.072>
16. **Akinyele D.O., Rayudu R.K., Tan R.H.G.** Comparative study of photovoltaic technologies based on performance, cost and space requirement: Strategy for selection and application // *Int. J. Green Energy*. 2016. V. 13. Is. 13. P. 1352–1368. <https://doi.org/10.1080/15435075.2015.1112287>
17. **Kern M.C., Jr., Russell E.C.** Combined photovoltaic and thermal hybrid collector systems // *Proc. of the 13th Photovoltaic Specialists Conf. Washington, D.C., 5–8 June 1978. Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 1978. P. 1153–1157.
18. **Performance** studies on a finned double-pass photovoltaic-thermal (PV/T) solar collector / M.Y. Othman, B. Yatim, K. Sopian, M.N.A. Bakar // *Desalination*. 2007. V. 209. Is. 1–3. P. 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.04.007>
19. **Abdin Z.Ul, Rachid A.** A survey on applications of hybrid PV/T panels // *Energies*. 2021. V. 14. Is. 4. P. 1205. <https://doi.org/10.3390/en14041205>
20. **Experimental** investigation of a PVT system performance using nano ferrofluids / M. Ghadiri, M. Sardarabadi, M. Pasandideh-fard, A.J. Moghadam // *Energy Convers. Manage.* 2015. V. 103. P. 468–476. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.077>
21. **Performance** evaluation of a solar photovoltaic system / W. Charfi, M. Chaabane, H. Mhiri, P. Bournot // *Energy Rep.* 2018. V. 4. P. 400–406. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2018.06.004>
22. **Solar** combined cooling, heating and power systems based on hybrid PVT, PV or solar-thermal collectors for building applications / M. Herrando, A.M. Pantaleo, K. Wang, C.N. Markides // *Renewable Energy*. 2019. V. 143. P. 637–647. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.05.004>

23. **Elsafi A.M.** Integration of humidification-dehumidification desalination and concentrated photovoltaic-thermal collectors: Energy and exergy-costing analysis // *Desalination*. 2017. V. 424. P. 17–26.  
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.09.022>
24. **Choubineh N., Jannesari H., Kasaeian A.** Experimental study of the effect of using phase change materials on the performance of an air-cooled photovoltaic system // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2019. V. 101. P. 103–111.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.001>
25. **Thermal** and electrical efficiencies enhancement of a solar photovoltaic-thermal/air system (PVT/air) using metal foams / M. Tahmasbi, M. Siavashi, A.M. Norouzi, M.H. Doranehgard // *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 2021. V. 124. P. 276–289.  
<https://doi.org/10.1016/J.JTICE.2021.03.045>
26. **Lamrani B., Draoui A., Kuznik F.** Thermal performance and environmental assessment of a hybrid solar-electrical wood dryer integrated with photovoltaic/thermal air collector and heat recovery system // *Sol. Energy*. 2021. V. 221. P. 60–74.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.04.035>
27. **Hegazy A. A.** Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors // *Energy Convers. Manage.* 2000. V. 41. Is. 8. P. 861–881.  
[https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(99\)00136-3](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00136-3)
28. **Tonui J.K., Tripanagnostopoulos Y.** Air-cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements // *Sol. Energy*. 2007. V. 81. Is. 4. P. 498–511.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.08.002>
29. **An improved** thermal and electrical model for a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector / F. Sarhaddi, S. Farahat, H. Ajam, A. Behzadmehr, M. M. Adeli // *Appl. Energy*. 2010. V. 87. Is. 7. P. 2328–2339.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.01.001>
30. **Performance** analysis of photovoltaic thermal air heaters / K. Sopian, K.S. Yigit, H.T. Liu, S. Kakaç, T.N. Veziroglu // *Energy Convers. Manage.* 1996. V. 37. Is. 11. P. 1657–1670.  
[https://doi.org/10.1016/0196-8904\(96\)00010-6](https://doi.org/10.1016/0196-8904(96)00010-6)
31. **Performance** evaluation of a hybrid photovoltaic thermal (PV/T) (glass-to-glass) system / A.S. Joshi, A. Tiwari, G.N. Tiwari, I. Dincer, B.V. Reddy // *Int. J. Therm. Sci.* 2009. V. 48. Is. 1. P. 154–164.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2008.05.001>
32. **Tiwari A., Sodha M.S.** Parametric study of various configurations of hybrid PV/thermal air collector: Experimental validation of theoretical model // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 2007. V. 91. Is. 1. P. 17–28.  
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2006.06.061>
33. **Dincer I., Rosen M.A.** Exergy as a driver for achieving sustainability // *Int. J. Green Energy*. 2007. V. 1. Is. 1. P. 1–19.  
<https://doi.org/10.1081/GE-120027881>
34. **Payne W.V.** Annual performance of a two-speed, dedicated dehumidification heat pump in the NIST net-zero energy residential test facility // *Proc. of the 2016 ASHRAE Winter Conf. Orlando, Florida, USA*, 23–27 Jan. 2016. V. 2. Is. 2009. P. 3–9.  
[https://tsapps.nist.gov/publication/get\\_pdf.cfm?pub\\_id=919148](https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=919148)
35. **Duraivelu R., Elumalai N.** Performance evaluation of a decentralized rooftop solar photovoltaic system with a heat recovery cooling unit // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2021. V. 28. P. 19351–19366.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-020-12104-0>
36. **A comparison** study of PV/thermal collector performance using air and water cooling / M.M. Awad, O.K. Ahmed, O.M. Ali, R.W. Daoud // *AIP Conf. Proc.* 2022. V. 2660. P. 020128.  
<https://doi.org/10.1063/5.0124223>
37. **Kim J.-H., Park S.-H., Kim J.-T.** Experimental performance of a photovoltaic-thermal air collector // *Energy Procedia*. 2014. V. 48. P. 888–894.  
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.102>
38. **Review** on photovoltaic/thermal hybrid solar collectors: Classifications, applications and new systems / A. Herez, H. El Hage, T. Lemenand, M. Ramadan, M. Khaled // *Sol. Energy*. 2020. V. 207. P. 1321–1347.  
<https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2020.07.062>
39. **Sultan S.M., Efsan M.N.E.** Review on recent photovoltaic/thermal (PV/T) technology advances and applications // *Sol. Energy*. 2018. V. 173. P. 939–954.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.08.032>
40. **Jha P., Das B., Gupta R.** Energy and exergy analysis of photovoltaic thermal air collector under climatic condition of North Eastern India // *Energy Procedia*. 2019. V. 158. P. 1161–1167.  
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.299>
41. **Energy** and exergy analyses of photovoltaic thermal collector with V-groove / A. Fudholi, M. Zohri, G.L. Jin, A. Ibrahim, Ch.H. Yen, M.Y. Othman, M.H. Ruslan, K. Sopian // *Sol. Energy*. 2018. V. 159. P. 742–750.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.11.056>
42. **Arslan E., Aktaş M., Can Ö.F.** Experimental and numerical investigation of a novel photovoltaic thermal (PV/T) collector with the energy and exergy analysis // *J. Cleaner. Prod.* 2020. V. 276. P. 123255.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123255>
43. **Energy** and exergy analysis of a photovoltaic thermal (PVT) system used in solar dryer: A numerical and experimental investigation / E. Çiftçi, A. Khanlari, A. Sözen, İ. Aytay, A.D. Tuncer // *Renewable Energy*. 2021. V. 180. P. 410–423.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.081>
44. **Selimefendigil F., Şirin C.** Energy and exergy analysis of a hybrid photovoltaic/thermal-air collector modified with nano-enhanced latent heat thermal energy storage unit // *J. Energy Storage*. 2022. V. 45. P. 103467.  
<https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103467>
45. **Mathematical** modeling of photovoltaic thermal PV/T system with v-groove collector / M. Zohri, A. Fudholi, M.H. Ruslan, K. Sopian // *AIP Conf. Proc.* 2017. V. 1862. P. 030063.  
<https://doi.org/10.1063/1.4991167>
46. **Ural T.** Experimental performance assessment of a new flat-plate solar air collector having textile fabric as absorber using energy and exergy analyses // *Energy*. 2019. V. 188. P. 116116.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116116>
47. **Khalil W.H., Obaid Z.A.H., Dawood H.K.** Exergy analysis of single-flow solar air collectors with different configurations of absorber plates // *Heat Transfer Res.*

2019. V. 48. Is. 8. P. 3600–3616.  
<https://doi.org/10.1002/htj.21558>
48. **Energetic** and exergetic analysis of a new double pass solar air collector with fins and phase change material / J. Assadeg, A.H.A. Al-Waeli, A. Fudholi, K. Sopian // *Sol. Energy*. 2021. V. 226. P. 260–271.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.08.056>
  49. **Energy** and exergy analysis of a trapezoidal absorber plate-based solar air collector / J. Reddy, Jagadish, S. Negi, B. Das, M.A. Ehyaei, M.E.H. Assad // *Energy Sci. Eng.* 2022. V. 10. Is. 4. P. 1067–1082.  
<https://doi.org/10.1002/ese3.1091>
  50. **Dimri N., Tiwari A., Tiwari G.N.** An overall exergy analysis of glass-tedlar photovoltaic thermal air collector incorporating thermoelectric cooler: A comparative study using artificial neural networks // *Energy Convers. Manage.* 2019. V. 195. P. 1350–1358.  
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.04.044>
  51. **Energy** and exergy analysis of a glazed solar preheating collector wall with non-uniform perforated corrugated plate / M. Gao, J. Fan, S. Furbo, Y. Xiang // *Renewable Energy*. 2022. V. 196. P. 1048–1063.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.026>
  52. **Mirzaei S., Ameri M., Ziafoughi A.** Energy-exergy analysis of an infrared dryer equipped with a photovoltaic-thermal collector in glazed and unglazed modes // *Renewable Energy*. 2021. V. 169. P. 541–556.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.046>
  53. **Effect** of shape of condensing cover on energy and exergy analysis of a PVT-CPC active solar distillation system / G.N. Tiwari, A.K. Mishra, M. Meraj, A. Ahmad, M.E. Khan // *Sol. Energy*. 2020. V. 205. P. 113–125.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.084>
  54. **Numerical** investigation of V-groove air-collector performance with changing cover in Bangi, Malaysia / I. Zulkifle, A.H.A. Alwaeli, M.H. Ruslan, Z. Ibrahim, M.Y.H. Othman, K. Sopian // *Case Stud. Therm. Eng.* 2018. V. 12. P. 587–599.  
<https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.07.012>
  55. **Tiwari S., Tiwari G.N.** Energy and exergy analysis of a mixed-mode greenhouse-type solar dryer, integrated with partially covered N-PVT air collector // *Energy*. 2017. V. 128. P. 183–195.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.022>
  56. **Experimental** and numerical analysis of a grooved hybrid photovoltaic-thermal solar drying system / A.D. Tuncer, A. Khanlari, F. Afshari, A. Sözen, E. Çiftçi, B. Kusun, İ. Şahinkesen // *Appl. Therm. Eng.* 2023. V. 218. P. 119288.  
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119288>
  57. **Şirin C., Selimefendigil F., Öztıp H.F.** Performance analysis and identification of an indirect photovoltaic thermal dryer with aluminum oxide nano-embedded thermal energy storage modification // *Sustainability*. 2023. V. 15. Is. 3. P. 2422.  
<https://doi.org/10.3390/su15032422>
  58. **Development** and testing of novel photovoltaic-thermal collector-based solar dryer for green tea drying application / A. Gupta, A. Biswas, B. Das, B.V. Reddy // *Sol. Energy*. 2022. V. 231. P. 1072–1091.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.12.030>
  59. **Fan W., Kokogiannakis G., Ma Z.** A multi-objective design optimisation strategy for hybrid photovoltaic thermal collector (PVT)-solar air heater (SAH) systems with fins // *Sol. Energy*. 2018. V. 163. P. 315–328.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.02.014>
  60. **System** design and feasibility of trigeneration systems with hybrid photovoltaic-thermal (PVT) collectors for zero energy office buildings in different climates / R. Braun, M. Haag, J. Stave, N. Abdelnour, U. Eicker // *Sol. Energy*. 2020. V. 196. P. 39–48.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.12.005>
  61. **Parametric** analysis and annual performance evaluation of an air-based integrated solar heating and radiative cooling collector / M. Hu, B. Zhao, X. Ao, Y. Su, G. Pei // *Energy*. 2018. V. 165. Part A. P. 811–824.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.127>
  62. **Hachchadi O., Bououd M., Mechaqrane A.** Performance analysis of photovoltaic-thermal air collectors combined with a water to air heat exchanger for renewed air conditioning in building // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2021. V. 28. P. 18953–18962.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-020-08052-4>
  63. **Experimentation**, modelling and applications of a novel low-cost air-based photovoltaic thermal collector prototype / G. Barone, A. Buonomano, C. Forzano, A. Palombo, O. Panagopoulos // *Energy Convers. Manage.* 2019. V. 195. P. 1079–1097.  
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.04.082>
  64. **Performance** assessment of PCM-based solar energy assisted desiccant air conditioning system combined with a humidification-dehumidification desalination unit / N. Wang, D. Wang, J. Dong, H. Wang, R. Wang, L. Shao, Y. Zhu // *Desalination*. 2020. V. 496. P. 114705.  
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114705>
  65. **Ghazy A.** Experimental thermal and electrical performances of a PVT-air collector coupled to a humidification-dehumidification (HDH) cycle // *Int. J. Renewable Energy Dev.* 2023. V. 12. Is. 3. P. 520–527.  
<https://doi.org/10.14710/ijred.2023.51808>
  66. **Energy** and exergoeconomic assessments of a renewable hybrid ERC/ORC integrated with solar dryer unit, PEM electrolyzer, and RO desalination subsystem / R.-E. Dong, S. Zhanguo, I.B. Mansir, A.M. Abed, X. Niu // *Process Saf. Environ. Prot.* 2023. V. 171. P. 812–833.  
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.01.038>
  67. **Integrating** photovoltaic thermal collectors and thermal energy storage systems using phase change materials with rotary desiccant cooling systems / H. Ren, Z. Ma, W. Lin, W. Fan, W. Li // *Sustainable Cities Soc.* 2018. V. 36. P. 131–143.  
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.10.021>
  68. **Multidimensional** assessment of a photovoltaic air collector integrated phase changing material considering Mexican climatic conditions / R. Tariq, J. Xamán, A. Bassam, L.J. Ricalde, M.A.E. Soberanis // *Energy*. 2020. V. 209. P. 118304.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118304>
  69. **Alqaed S.** Effect of using a solar hot air collector installed on the inclined roof of a building for cooling and heating system in the presence of polymeric PCM // *Sustainable Energy Technol. Assess.* 2022. V. 50.

- P. 101852.  
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101852>
70. **Experimental** investigation and two-level model-based optimisation of a solar photovoltaic thermal collector coupled with phase change material thermal energy storage / W. Lin, Z. Ma, S. Wang, M.I. Sohel, E. Lo Cascio // Appl. Therm. Eng. 2021. V. 182. P. 116098.  
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116098>
  71. **Gan G., Xiang Y.** Experimental investigation of a photovoltaic thermal collector with energy storage for power generation, building heating and natural ventilation // Renewable Energy. 2020. V. 150. P. 12–22.
  72. **Chialastri A., Isaacson M.** Performance and optimization of a BIPV/T solar air collector for building fenestration applications // Energy Build. 2017. V. 150. P. 200–210.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.064>
  73. **Energy** metrics assessment of a photovoltaic thermal air collector (PVTAC): a comparison between flat and wavy collector / P. Jha, J.D. Mondol, B. Das, R. Gupta // Energy Sources. Part A: Recover. Util. Environ. Eff. 2024. V. 46. Is. 1. P. 15052–15070.  
<https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1809563>
  74. **Experimental** and numerical study of the PVT design impact on the electrical and thermal performances / E. Touti, M. Masmali, M. Fterich, H. Chouikhi // Case Stud. Therm. Eng. 2023. V. 43. P. 102732.  
<https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102732>
  75. **Artificial** neural-network based model to forecast the electrical and thermal efficiencies of PVT air collector systems / Y. Chaibi, M. Malvoni, T. El Rhafiki, T. Kousksou, Y. Zeraoui // Clean. Eng. Technol. 2021. V. 4. P. 100132.  
<https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100132>

## Photovoltaic Thermal Air Collectors: Recent Advances in Performance Enhancement and Solar Thermal Applications (Review)

S. Gardner<sup>a, b</sup>, L. M. Thomas<sup>a</sup>, B. P. Singh<sup>b</sup>, and B. S. Gardner<sup>a, \*</sup>

<sup>a</sup> St. John's College, Mahatma Gandhi Rd, Agra, Uttar Pradesh, 282002 India

<sup>b</sup> Dr. Bhimrao Ambedkar University, Kalma Nagar, Civil Lines, Agra, Uttar Pradesh, 282004 India

\*e-mail: bobstanleygardner@gmail.com

**Abstract**—In the recent years, photovoltaic thermal (PVT) devices have immensely grown in popularity. PVT devices harness clean energy and are considered the best alternative to renewable energy when considering the simultaneous generation of both useful heat and electricity, thus providing a higher overall energy yield and improved performance as compared to single-function systems. These devices use either air, water or nanofluid as coolant. Although much work has been done in the field of PVT systems using water/nanofluid as coolant, there is a gap in literature on the use of PVT air collector (PVTAC) for the same. The aim of this review is to study the development of these devices through a study of the various parameters such as mass flow rate, different absorber configurations, use of coatings and glazing on which the performance of such systems depends. This study is done with exergy efficiency as performance evaluator. This review also discusses the various applications of the PVT air collectors. It is to be noted that this study is focused primarily on the recent development in these devices. The conclusion offers merits and demerits of the system as well as recommendations for future scope of study.

**Keywords:** photovoltaic thermal air collectors, PVTAC, exergy, solar energy, electrical efficiency, exergy efficiency