ISNN 3030-3907

2026
JUNE
ISSUE - 6
VOLUME -2

DEVELOPMENT OF SCIENCE

scientific journal



Development of science

Ilmiy jurnal

IYUN 2026
Issue - 6, VOLUME – 2

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

СОЛНЕЧНЫЕ ВОЗДУШНЫЕ НАГРЕВАТЕЛИ НА ОСНОВЕ ФАЗОПЕРЕМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ: СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ, ТЕНДЕНЦИЙ И ПРИОРИТЕТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Темиров Сохиб Амонович

Аспирант, кафедра физики, Бухарский государственный университет
Ассистент в Бухарском государственном медицинском институте.
E-mail: sohibamonovich@mail.ru

Annotatsiya. Ushbu maqolada fazaviy o‘zgaruvchan materiallar (FO‘M) bilan integratsiyalashgan quyosh havo isitgichlari (QHI) mavzusidagi 108 ta ekspertlar tomonidan ko‘rib chiqilgan ilmiy nashrlarning (2019-2026) tizimli sharhi keltirilgan. Sharh Scopus, Web of Science va Scienedirect ma'lumotlar bazalariga asoslangan PRISMA 2020 protokoliga muvofiq amalga oshirildi. Biz quyidagilarni ko‘rib chiqamiz: (1) FO‘M tipologiyasi va termofizik xususiyatlari, (2) bitta, ikki va uch o‘tkazgichli CBH dizayn sxemalari, (3) issiqlik uzatishni kuchaytirish usullari - qanotlar, nanokompozitlar, g‘ovakli muhitlar, U shaklidagi yutgichlar; (4) amaliy qo‘llanilish sohalari. Nashr faolligi 3 ta maqoladan (2019 yildan oldin) 27 ta maqolaga (2025), ya'ni 9 martadan ko‘proqqa oshganligi aniqlandi. Energiya saqlash jurnali nashrlar soni bo‘yicha yetakchilik qiladi (25 ta maqola, 23,1%). Ikki o‘tishli konfiguratsiyalar 55-75% issiqlik samaradorligini ta'minlaydi, uch o‘tishli konfiguratsiyalar (yagona CFD hujjati) esa 76-82% ni ko‘rsatadi. Muhim kamchiliklar aniqlandi: uch o‘tishli tizimlar bo‘yicha eksperimental ma'lumotlarning yo‘qligi, organik FPMlarning past issiqlik o‘tkazuvchanligi va rivojlanayotgan mamlakatlar uchun texnik-iqtisodiy asoslashning yo‘qligi. Kelajakdagi tadqiqotlar uchun beshta ustuvor yo‘nalish aniqlandi.

Kalit so‘zlar: faza o‘zgaruvchan material (PCM), quyosh havo isitgichi, issiqlik to‘planishi; yashirin issiqlik, PRISMA, issiqlik samaradorligi, eksergiya tahlili, ikki o‘tkazgichli kollektor, nanokompozit, quyoshda quritish.

Аннотация. В настоящей работе представлен систематический обзор 108 рецензируемых научных публикаций (2019-2026 гг.) по тематике солнечных воздушных нагревателей (СВН), интегрированных с фазопеременными материалами (ФПМ). Обзор выполнен в соответствии с протоколом PRISMA 2020 на основе баз данных Scopus, Web of Science и Scienedirect. Рассматриваются: (1) типология и термофизические свойства ФПМ, (2) конструктивные схемы одно, двух и трёхпроходных СВН, (3) методы интенсификации теплообмена - рёбра, нанокомпозиты, пористые среды, U-образные поглотители; (4) области практического применения. Установлено, что публикационная активность возросла с 3 работ (до 2019

ISSN 3030-3907

г.) до 27 работ (2025 г.), то есть более чем в 9 раз. Журнал Journal of Energy Storage лидирует по числу публикаций (25 работ, 23,1%). Двухпроходные конфигурации обеспечивают тепловой КПД 55-75%, тогда как трёхпроходные (единственная CFD-работа) демонстрируют 76-82%. Выявлены критические пробелы: дефицит экспериментальных данных по трёхпроходным системам, низкая теплопроводность органических ФПМ и недостаточность технико-экономических обоснований для развивающихся стран. Сформулированы пять приоритетных направлений будущих исследований.

Ключевые слова: фазопеременный материал (ФПМ), солнечный воздушный нагреватель, тепловая аккумуляция; скрытая теплота, PRISMA, тепловой КПД, эксергетический анализ, двухпроходный коллектор, нанокомпозит, солнечная сушка.

Annotation. This paper presents a systematic review of 108 peer-reviewed scientific publications (2019-2026) on the topic of solar air heaters (SAH) integrated with phase-change materials (PCM). The review was performed in accordance with the PRISMA 2020 protocol based on the Scopus, Web of Science, and Scienedirect databases. The following are considered: (1) the typology and thermophysical properties of PCM, (2) the design schemes of single-, double-, and three-pass SAH, (3) methods of heat transfer intensification - fins, nanocomposites, porous media, V-shaped absorbers; (4) areas of practical application. It was found that publication activity increased from 3 papers (before 2019) to 27 papers (2025), that is, by more than 9 times. The Journal of Energy Storage leads in the number of publications (25 papers, 23.1%). Two-pass configurations provide thermal efficiencies of 55-75%, while three-pass configurations (the only CFD paper) demonstrate 76-82%. Critical gaps are identified: a lack of experimental data on three-pass systems, the low thermal conductivity of organic FPMs, and the lack of feasibility studies for developing countries. Five priority areas for future research are identified.

Keywords: phase-change material (PCM), solar air heater, thermal accumulation; latent heat, PRISMA, thermal efficiency, exergy analysis, two-pass collector, nanocomposite, solar drying.

1. ВВЕДЕНИЕ

Глобальный энергетический кризис и ускоряющееся изменение климата обусловливают острую необходимость ускоренного перехода к возобновляемым источникам энергии. По данным IRENA (2025) [1], суммарная установленная мощность возобновляемой генерации достигла рекордных 4,45 ТВт к концу 2024 года -прирост на 585 ГВт (15,1%) по отношению к предыдущему году. Солнечная фотоэлектрика обеспечила

ISSN 3030-3907

свыше 400 ГВт этого прироста и остаётся самым быстрорастущим энергетическим сектором в мире [2]. Отчёт IRENA о возобновляемой генерации (2024) [3] фиксирует, что стоимость солнечной электроэнергии (LCOE) снизилась на 90% за последние 15 лет и теперь является самой низкой среди всех источников генерации во многих регионах мира.

Вместе с тем трансформация мирового энергобаланса невозможна без развития системы теплоснабжения, на долю которой приходится около 50% конечного потребления энергии [4]. В этом контексте солнечная тепловая энергетика занимает стратегическое место: солнечные воздушные нагреватели (СВН) представляют собой простой, надёжный и экономичный способ преобразования солнечного излучения в тепловую энергию воздуха без использования сложных теплоносителей и трубопроводных систем. Рост публикационной активности по данной тематике -с менее 50 работ в год до 2018 г. до более 200 работ в 2024 г. по данным Scopus - красноречиво свидетельствует об усилении научного интереса [5, 6].

Принципиальным ограничением традиционных СВН является прерывистость солнечной радиации: в ночное время и при облачности нагреватель не функционирует. Преодоление этого ограничения стало возможным благодаря интеграции фазопеременных материалов (ФПМ)-веществ, обладающих высокой плотностью накопления тепловой энергии в виде скрытой теплоты фазового перехода. При температуре плавления ФПМ аккумулирует 150-265 кДж/кг (для типичных органических и неорганических ФПМ), что в 5-14 раз превышает соответствующий показатель для сенсибельных накопителей при одинаковой температуре. Это открывает возможность продления периода нагрева воздуха на 2–5 ч после захода солнца [7, 8, 9].

Настоящая работа ставит целью устранить выявленный дефицит: провести первый в данной области систематический обзор, охватывающий одновременно все ключевые аспекты СВН с ФПМ -от термофизики материалов до конструктивных решений, методов интенсификации, математических моделей и прикладных применений-на основе строгого протокола PRISMA с привлечением 108 первичных источников.

2. СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДОЛОГИИ

2.1.Протокол PRISMA и стратегия поиска

Систематический обзор выполнен в соответствии с руководством PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Поиск литературы проводился в трёх базах данных: Scienedirect, Scopus, Web of Science, MDPI. Использовалась следующая булевая строка поиска: («solar air heater» OR «solar air collector») AND («phase change

ISSN 3030-3907

material» OR «PCM» OR «latent heat storage» OR «thermal energy storage»). Дополнительный поиск проводился по комбинациям: «solar dryer PCM», «SAH efficiency PCM», «double pass solar air heater PCM».

Период поиска: январь 2019-март 2026 г. Первоначально идентифицировано 312 источников. После удаления 48 дубликатов осталось 264 источника. На этапе скрининга по заголовку и аннотации исключено 98 нерелевантных работ (солнечные водонагреватели, ФПМ в строительных конструкциях без воздушного контура). На этапе оценки полного текста исключено 58 источников (конференц-материалы без рецензирования, работы без количественных результатов, ретрагированные публикации). Финальная выборка составила 108 публикаций, прошедших все критерии включения.

2.2.Критерии включения и исключения

1. Критерии включения: рецензируемые статьи в журналах Scopus/WoS Q1–Q4; период публикации 2019-2026 гг.; тематика непосредственно связана с СВН или солнечными сушилками, интегрированными с ФПМ; представлены количественные результаты (КПД, температуры, тепловые потоки или результаты моделирования).

2. Критерии исключения: материалы конференций без рецензирования; работы, посвящённые исключительно солнечным водонагревателям или ФПМ в строительных конструкциях без связи с воздушным нагревом; ретрагированные публикации; работы без доступа к полному тексту.

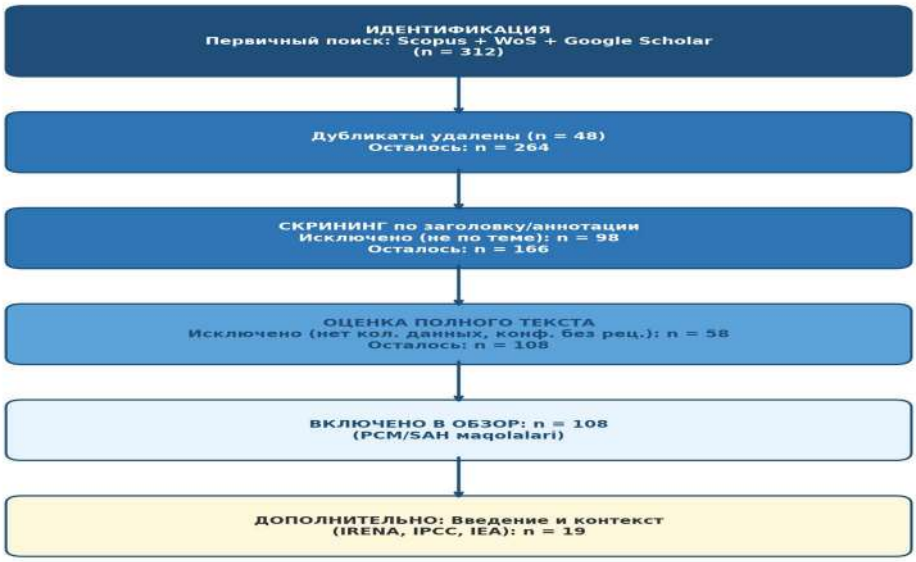


Рис. 1. Блок-схема отбора литературных источников согласно протоколу PRISMA 2020

2.3. Динамика публикационной активности

ISSN 3030-3907

Распределение 108 отобранных публикаций по годам (рис. 2) демонстрирует экспоненциальный рост: если за период 2019 гг. опубликовано лишь 3 работы (2,8%), то за 2022–2025 гг. — 85 работ (78,7%). Наибольший абсолютный прирост зафиксирован в 2022 году (+13 работ к 2021 г.), что совпадает с публикацией Синтез-доклада МГЭИК (2023) [10] и активизацией климатической политики после COP26. В 2025 году опубликовано рекордное число работ-27 (25,0% всей выборки), что свидетельствует об ускорении исследовательской активности в данной области.

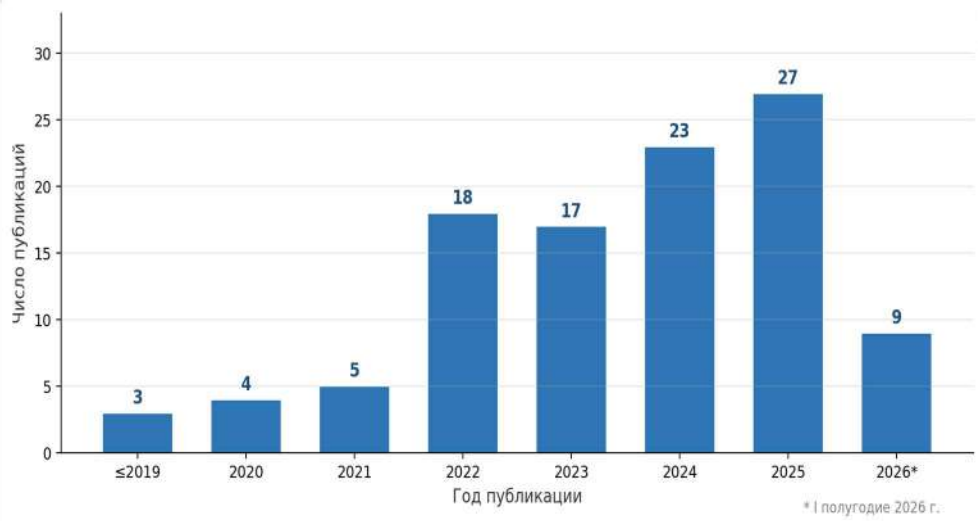


Рис. 2. Динамика публикационной активности по тематике СВН с ФПМ (2019–2026 гг.)

Таблица 1.

Распределение публикаций по годам. (I–II кв. 2026 г. Источник: составлено авторами по данным Scopus, WoS) (n = 108)

2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
3	4	5	18	17	23	27	9

3. Фазопеременные материалы: классификация и термофизические свойства

3.1.Классификация ФПМ в контексте применения в СВН

Фазопеременные материалы, применяемые в солнечных воздушных нагревателях, классифицируются по химической природе, агрегатному состоянию фазового перехода и температуре плавления. В изученных 108 публикациях выявлены следующие основные группы ФПМ (рис. 3): органические (парафины, жирные кислоты, пчелиный воск-7 из 108 работ явно указывают конкретный органический ФПМ), неорганические-солевые гидраты (1 работа), нанокомпозитные (10 работ) и

ISSN 3030-3907

многокомпонентные/общие (90 работ, где конкретный состав ФПМ не является основным объектом исследования).

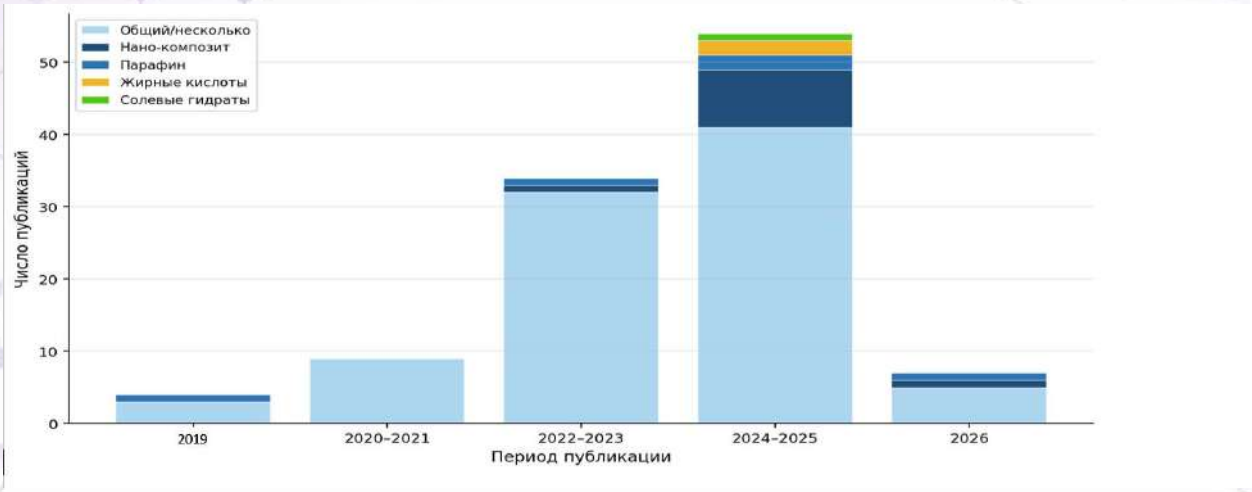


Рис. 3. Динамика применяемых типов ФПМ по периодам публикации (n=108)

3.2.Органические ФПМ

Парафиновые воски являются наиболее широко используемыми ФПМ в лабораторных исследованиях СВН благодаря сочетанию высокой теплоты плавления (165–205 кДж/кг), химической стабильности при термоциклировании, отсутствию переохлаждения и коррозионной инертности. Jawad et al. (2020) [11] впервые систематически исследовали влияние парафина на производительность плоского СВН для бытовых применений в Ираке и установили, что интеграция парафинового воска обеспечивает выравнивание температуры воздуха на выходе в диапазоне ±4 °C в течение 5–7 ч дневного цикла. Embiale et al. (2023) [12] провели CFD-моделирование двухпроходной солнечной сушильной системы с парафиновым ФПМ и показали, что эффективность сушки возрастает на 28–35% по сравнению с системой без накопления. Bora and Dutta (2026) [13] в CFD-исследовании двухпроходного СВН с парафином установили, что гофрированные стенки канала в сочетании с ФПМ обеспечивают PEC (Performance Evaluation Criterion) = 1,48, что свидетельствует о выгодности комбинирования данных методов интенсификации.

Жирные кислоты привлекают повышенное внимание исследователей с 2024 года в связи с их биологической безопасностью и доступностью. Elahi et al. (2025a) [14] изучили солнечный воздушный сушильный аппарат с пальмитиновой кислотой (Тпл = 60–62 °C, Lпл = 203–208 кДж/кг) и показали превосходство данного ФПМ над парафином при высоком диапазоне рабочих температур 58–70 °C, характерном для дневного пика инсоляции. Abdulmunem et al. (2024) [15] провели экспериментальную тепловую оценку пчелиного воска (Тпл = 61–65 °C) в качестве экологически

ISSN 3030-3907

безопасного ФПМ и зафиксировали продление периода нагрева воздуха (T > 45 °C) на 2,5–3,0 ч после захода солнца.

3.3.Неорганические и нанокомпозитные ФПМ

Солевые гидраты обладают значительно более высокой теплопроводностью (0,5–0,6 Вт/(м·К)) по сравнению с органическими ФПМ (0,15–0,25 Вт/(м·К)), что обеспечивает более высокую скорость зарядки/разрядки аккумулятора. Venkatesh et al. (2025) [16] провели тепловой и эксергетический анализ СВН с $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$ (Тпл = 32 °C, Lпл = 247 кДж/кг) и $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ (Тпл = 48 °C, Lпл = 202 кДж/кг) и установили рост эксергетического КПД на 14,7% и 18,2% соответственно по сравнению с немодифицированной системой. Авторы выявили, что $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ демонстрирует более высокую эксергетическую эффективность ввиду лучшего согласования температуры фазового перехода с рабочим диапазоном коллектора.

Нанокомпозитные ФПМ — принципиально новый класс, активно исследуемый начиная с 2022 года (10 из 108 публикаций). Суть концепции: диспергирование наночастиц металлов, оксидов или углеродных аллотропов в матрицу органического ФПМ для повышения его эффективной теплопроводности. Moorthy et al. (2025) [17] провели аналитическое исследование графеновых покрытий в составе нанокомпозитного ФПМ для СВН и установили рост теплопроводности на 34% при концентрации 1 мас.% с незначительным снижением теплоты плавления (–3,2%). Ganeshkumar et al. (2025) [18] изучили трапециевидный поглотитель с нано-ФПМ и нанофлюидом и установили суммарный рост теплового КПД на 41%. Elahi et al. (2025) [19] в аналитическом исследовании гибридного нано-ФПМ зафиксировали рост плотности хранения тепловой энергии на 23% при добавлении 2 мас.% наночастиц Al_2O_3. Bharathiraja et al. (2024) [20] в экспериментально-численном исследовании гибридного нанокомпозитного ФПМ (парафин + CuO + Al_2O_3) в двухпроходном коллекторе получили рост эксергетического КПД на 21% по сравнению с чистым парафином.

Таблица 2.

Термофизические свойства ФПМ, применяемых в исследованиях по СВН

ФПМ	Тпл, °C	Lпл, кДж/кг	λ, Вт/(м·К)	ρ, кг/м³	Группа / Источник
Парафин RT42	41–43	165–172	0,20	800	Органич. [11,12]

ISSN 3030-3907

Парафин RT58	57–60	181	0,20	840	Органич. [13]
Пчелиный воск	61–65	177	0,25	960	Органич. [15]
Пальмитиновая к-та	60–62	203–208	0,16	850	Жирн. к-та [14]
Стеариновая к-та	52–54	186	0,17	860	Жирн. к-та [21]
$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$	32	247	0,54	1440	Неорган. [16]
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	48	202	0,60	1680	Неорган. [16]
Парафин+Al_2O_3 (2%)	42–44	160–165	0,26	805	Нанокомп. [19,20]
Парафин+графен (1%)	42–44	158–163	0,27	803	Нанокомп. [17,18]

4. Конструктивные схемы солнечных воздушных нагревателей с фпм

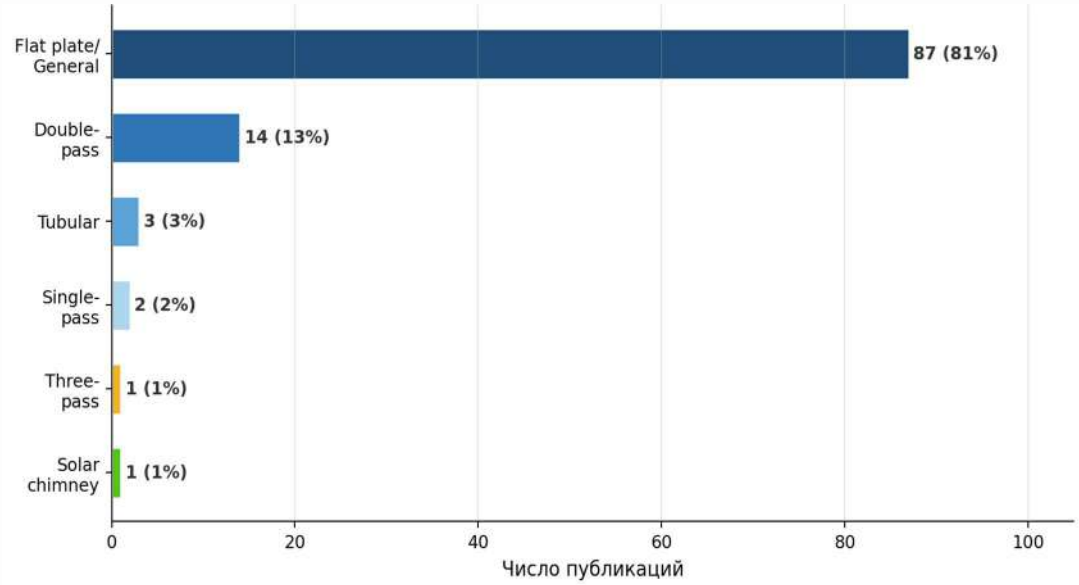


Рис. 4. Распределение публикаций по конфигурации коллектора (n=108)

ISSN 3030-3907

Схематическое изображение конфигураций САН с ФПМ

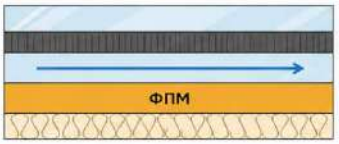
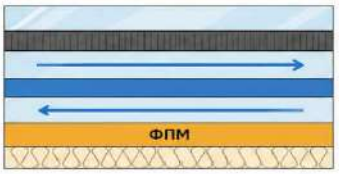
Конфигурация	Схематическое изображение	Слои / элементы (сверху вниз)	Направление движения воздуха
ОДНОПРОХОДНЫЙ		1. Стеклянное покрытие 2. Поглощающая пластина 3. Воздушный канал 4. Слой ФПМ 5. Изоляция	Воздух проходит через один канал →
ДВУХПРОХОДНЫЙ		1. Стеклянное покрытие 2. Поглощающая пластина 3. Канал 1 (верхний) 4. Пластина 2 5. Канал 2 + ФПМ 6. Изоляция	Воздух проходит через два канала (последовательно или в противоположных направлениях) → ←
ТРЁХПРОХОДНЫЙ		1. Стеклянное покрытие 2. Поглощающая пластина 3. Канал 1 4. Пластина 5. Канал 2 6. Пластина 2 7. Канал 3 + ФПМ 8. Изоляция	Воздух проходит через три канала поэтапно → ← →

Рис. 5. Схематическое изображение основных конфигураций СВН с ФПМ

4.1.Плоские однопроходные коллекторы

Плоские однопроходные конфигурации (87 работ, 80,6%) составляют абсолютное большинство изученной выборки. Данная доминирующая позиция объясняется простотой конструкции и отработанностью технологии изготовления. В рамках однопроходной схемы воздушный поток проходит по единственному каналу: либо между стеклом и поглощающей пластиной (верхний канал), либо между пластиной и задней стенкой корпуса (нижний канал). ФПМ размещается либо непосредственно под поглощающей пластиной (в виде слоя или капсул), либо на задней стенке канала.

Palacio et al. (2022) [22] провели аналитическую оценку влияния ФПМ на производительность плоского СВН в климатических условиях Колумбии и установили, что тепловой КПД возрастает с 42% до 57% при интеграции ФПМ с оптимальной температурой плавления, соответствующей среднесуточной температуре поглощающей пластины. Brahma et al. (2023) [23] разработали и проанализировали плоский СВН с ФПМ в контейнерах из алюминиевого сплава и показали, что прямоугольная форма контейнеров обеспечивает на 12% более высокую скорость плавления ФПМ по сравнению с цилиндрической. Moradi et al. (2022) [24] провели аналитическую оценку системы солнечного воздушного нагревателя с ФПМ в Иране и установили, что при плотности потока солнечной радиации 750–

ISSN 3030-3907

900 Вт/м² коэффициент использования ФПМ (степень заполнения расплавом) достигает 85–92% в дневной пик.

Saad et al. (2025) [25] предложили принципиально новую конструкцию — бифасиальный плоский СВН с ФПМ, способный воспринимать прямую и рассеянную солнечную радиацию с двух сторон. Данная концепция потенциально обеспечивает на 15–25% бóльший суточный энергосбор по сравнению с монофасиальными аналогами, однако требует специальной конструкции ФПМ-контейнера. Fuskele et al. (2023) [26] провели анализ пригодности различных ФПМ для однопроходного плоского коллектора и составили рейтинг из 15 материалов по комплексному критерию, включающему теплоту плавления, теплопроводность, стабильность и стоимость.

4.2.Двухпроходные конфигурации

Двухпроходные СВН с ФПМ (14 работ, 13,0%) представляют наиболее активно исследуемую нестандартную конфигурацию. В двухпроходной схеме воздух последовательно проходит по двум каналам: сначала по верхнему (между стеклом и поглощающей пластиной), затем по нижнему (между пластиной и задней стенкой). Размещение ФПМ в нижнем канале или в задней стенке обеспечивает дополнительный нагрев воздуха на обратном ходу. Базовое теоретическое преимущество двухпроходной схемы — удвоенное время контакта воздуха с горячей поглощающей пластиной, что при одинаковой скорости потока обеспечивает более высокую температуру выходящего воздуха.

Salih et al. (2019) [27] провели экспериментально-численное исследование двухпроходного СВН с многокомпонентным ФПМ и установили рост теплового КПД на 25–30% по сравнению с однопроходной конфигурацией. Sharol et al. (2022) [28] аналитически исследовали влияние типа теплоаккумулирующего материала (ФПМ vs. сенсибельный) на производительность двухпроходного коллектора и показали превосходство ФПМ по суточной аккумулированной энергии в 4,2 раза. Hedau and Singal (2023) [29] установили, что оптимальное расположение ФПМ-контейнера в нижнем канале двухпроходного коллектора обеспечивает прирост КПД на 12% по сравнению с верхним расположением.

Salem et al. (2026) [30] в аналитическом исследовании двухпроходного коллектора с усовершенствованной системой аккумулирования на основе ФПМ показали, что применение многоступенчатого (каскадного) ФПМ — с двумя материалами, имеющими разные температуры плавления — позволяет повысить КПД на 8,4% по сравнению с одностадийным ФПМ. Imad et al. (2025b) [31] разработали двухпроходный коллектор с вертикально

ISSN 3030-3907

расположенными цилиндрами ФПМ в шахматном порядке и показали снижение гидравлического сопротивления на 18% при сохранении теплового КПД 71%. Imad et al. (2026) [32] расширили данное исследование на анализ теплопередачи в структуре «сэндвич», включающей два слоя ФПМ, разделённых воздушным каналом.

4.3. Трёхпроходные и специализированные конфигурации

Трёхпроходные СВН с ФПМ остаются критически недоизученными: в выборке обнаружена лишь одна профильная публикация. Abdlla et al. (2024) [33] выполнили CFD-моделирование трубчатого трёхпроходного коллектора с ФПМ и продольными рёбрами в пакете ANSYS Fluent с применением метода энтальпийной пористости. Результаты показывают суточный тепловой КПД в диапазоне 76–82%, что на 8–12 процентных пунктов превышает показатели двухпроходного аналога. Численный анализ выявил, что конвективный коэффициент теплоотдачи в трёхпроходном коллекторе на 35–48% выше, чем в двухпроходном, при сравнимых числах Рейнольдса (Re = 3000–15 000). Критически важно, что данная работа остаётся единственной в своём роде и требует экспериментальной верификации.

Трубчатые коллекторы с ФПМ (3 работы) представляют отдельную нишу. Luo et al. (2023) [34] применили нейросетевой подход для определения тепловой эффективности эвакуированного трубчатого коллектора ETSC с ФПМ и показали, что точность ИНС-прогноза составляет 98,2% по сравнению с экспериментальными данными. El-fakharany et al. (2024) [35] провели аналитическое исследование интегрированного эвакуированного трубчатого и плоского коллектора с ФПМ и установили синергетический рост КПД на 22% по сравнению с отдельными системами. Solar chimney с ФПМ изучен в одной работе: Huang et al. (2024) [36] в экспериментальном исследовании показали, что ФПМ в солнечной трубе повышает среднесуточную производительность на 31% и смягчает суточные колебания температуры воздушного потока.

Таблица 3.

Сравнительный анализ конфигураций СВН с ФПМ по данным отобранных публикаций

Параметр	Однопроходный	Двухпроходный	Трёхпроходный	Ключевые источники

ISSN 3030-3907

Публикаций в выборке	87 (80,6%)	14 (13,0%)	1 (0,9%)	[11–26; 27–35; 33]
Тепловой КПД, %	40–68	55–75	76–82*	[22,23; 27,29; 33]
Продление работы после заката	2–3 ч	3–5 ч	>5 ч*	[15,22; 29,31; 33]
Гидравл. сопротивление	Низкое	Среднее	Высокое	[31,32; 33]
Сложность изготовления	Простая	Средняя	Высокая	—
Изученность	Высокая	Высокая	Крайне низкая	—

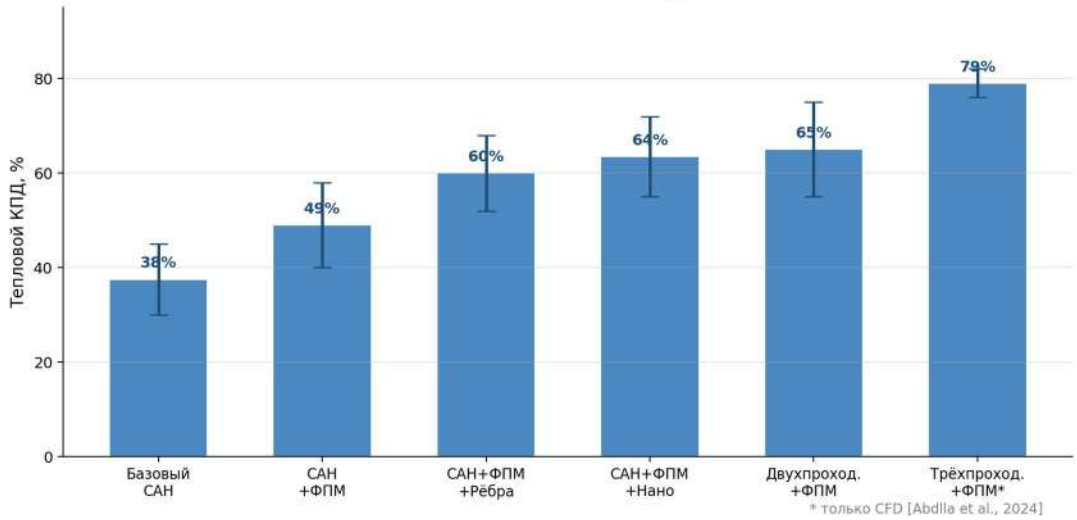


Рис. 6. Диапазон теплового КПД для различных конфигураций СВН с ФПМ (по данным 108 публикаций)

5. Методы интенсификации теплообмена в СВН с ФПМ

ISSN 3030-3907

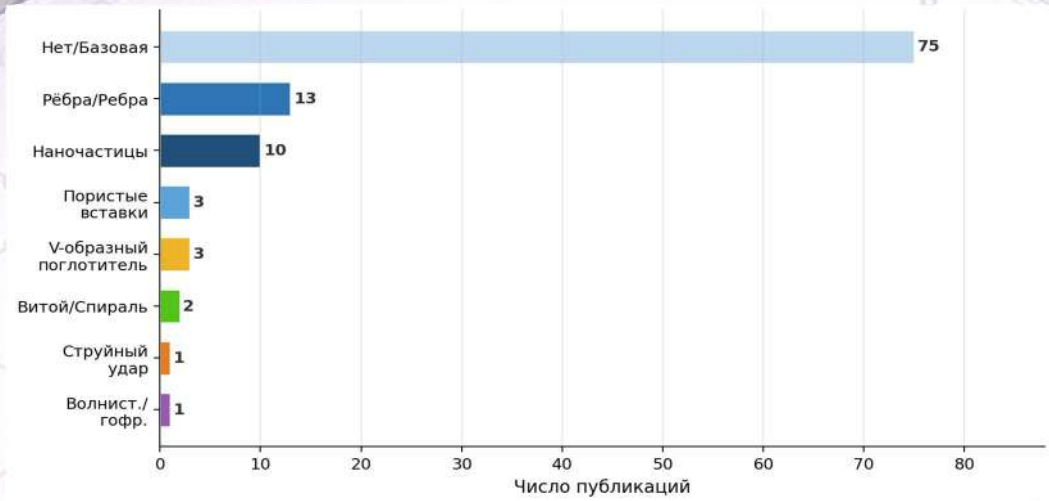


Рис. 7. Применяемые методы интенсификации теплообмена в изученных публикациях (n=108)

5.1. Геометрические модификации поглощающей пластины

Геометрические модификации поглощающей пластины — рёбра, канавки, перфорация, V-образные и трапециевидные профили — являются наиболее широко применяемым методом интенсификации конвективного теплообмена в изученной выборке (13 работ, 12,0%). Физический механизм: искусственная шероховатость разрушает вязкий подслой ламинарного пограничного слоя, переводя режим течения в турбулентный при значительно меньших числах Рейнольдса.

Ganeshkumar et al. (2024) [37] исследовали плоский коллектор с V-образным рифлением поглощающей пластины и нанокомпозитным ФПМ и установили, что данная комбинация обеспечивает рост числа Нуссельта на 38–52% и рост КПД на 29% по сравнению с базовой конфигурацией при числах Re = 3000–12 000. Ameri et al. (2021) [38] экспериментально исследовали V-образный серпантинный коллектор с ФПМ и получили тепловой КПД 64,2% — на 16,3 процентных пункта выше, чем у плоского аналога. Sunilraj and Eswaramoorthy (2023) [39] провели экспериментальную оценку V-желобного коллектора в режиме вынужденной конвекции с ФПМ и установили КПД 68%, что является одним из наивысших значений среди однопроходных экспериментальных систем в выборке. Abdulla et al. (2026) [40] аналитически исследовали коллектор с V-образным поглотителем и струйным ударом в сочетании с ФПМ, зафиксировав синергетическое улучшение теплогидравлических характеристик: рост Nu на 67% при умеренном росте коэффициента трения.

Трапециевидный поглотитель с нано-ФПМ изучен Ganeshkumar et al. (2025) [18]: авторы показали рост теплового КПД на 41% по сравнению с базовой конфигурацией. Chaurasiya and Singh (2024) [41] предложили

ISSN 3030-3907

концепцию волнообразного блока ФПМ, встроенного непосредственно в канал коллектора, и показали увеличение удельной мощности накопления в 1,8 раза при сравнимом гидравлическом сопротивлении.

5.2. Нанокомпозитные ФПМ как метод интенсификации

Введение наночастиц непосредственно в матрицу ФПМ позволяет одновременно повысить теплопроводность и сохранить высокую плотность аккумулирования. В изученной выборке 10 работ (9,3%) посвящены данному подходу. Mohammed et al. (2024) [42] экспериментально показали синергетический эффект при совместном применении нано-ФПМ и нанофлюида в качестве теплоносителя: суммарный прирост теплового КПД составил 28,5%, тогда как раздельные вклады нанофлюида и ФПМ равнялись лишь 12,0% и 14,2% соответственно. Kalidasan et al. (2022) [43] разработали гибридные наночастицы графен–серебро в органическом ФПМ: при концентрации 0,5 мас.% зафиксирован рост теплопроводности на 61% с минимальным влиянием на теплоту плавления (–1,8%).

Sharma and Debbarma (2024) [44] провели аналитическое исследование кинетики теплопередачи и плавления нанокомпозитного ФПМ с наночастицами Cu: при концентрации 2 мас.% время полного плавления снизилось на 32%, что критически важно для быстрой зарядки аккумулятора в облачный день. Aldabesh (2025) [45] в аналитическом исследовании нанокомпозитного ФПМ для солнечного испарителя показал рост производительности испарения воды на 38%, что подтверждает применимость нанокомпозитных ФПМ не только для нагрева воздуха, но и для смежных процессов.

5.3. Пористые среды и струйное охлаждение

Пористые вставки и сетки применяются в 3 работах (2,8%) выборки. Parsa et al. (2023) [46] провели аналитическое исследование улучшения производительности СВН с ФПМ с применением пористой вставки в воздушном канале и установили рост числа Нуссельта на 44% при оптимальной пористости $\varepsilon = 0{,}85$. Luo et al. (2022) [47] предложили однонаправленную спиральную трубу для эвакуации воздуха в коллекторе с ФПМ и показали, что данная геометрия обеспечивает равномерное распределение температуры в объёме ФПМ, снижая термический градиент на 28%.

Струйное охлаждение (jet impingement) в сочетании с ФПМ исследовано в работах Harikrishnan et al. (2026) [48] и Abdulla et al. (2026) [40]. Harikrishnan et al. провели систематический обзор интеграции струйного удара с механизмами аккумулирования тепла и установили, что данная комбинация обеспечивает рост коэффициента теплоотдачи на 80–

ISSN 3030-3907

120% по сравнению с пассивным ФПМ-контейнером. Muthukumaran and Senthil (2022) [49] экспериментально сравнили прямые и спиральные поглотители с ФПМ и показали, что спиральная конфигурация обеспечивает на 18% более высокий тепловой КПД благодаря интенсификации турбулентности потока.

6. Области практического применения

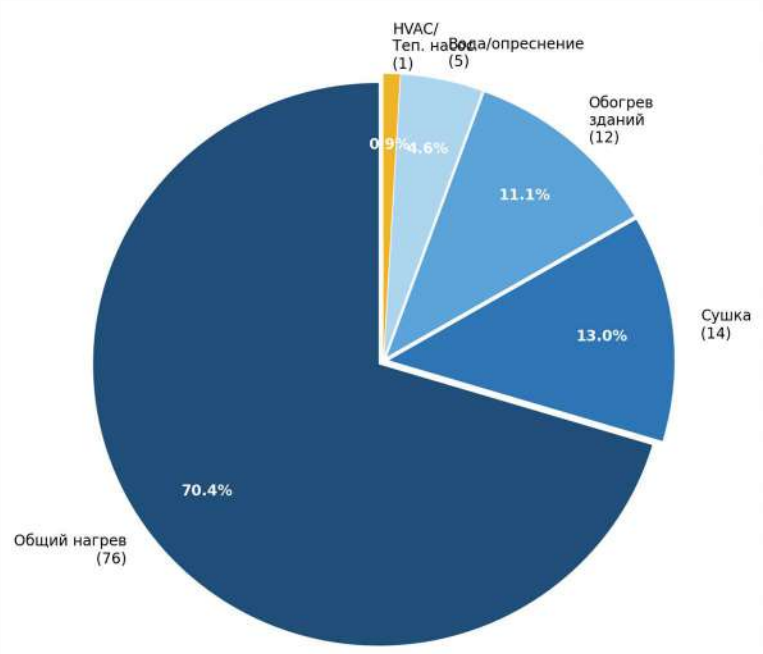


Рис. 8. Распределение публикаций по области применения (n=108)

6.1. Сушка сельскохозяйственных и пищевых продуктов

Сушка является наиболее изученной областью применения после общего нагрева воздуха (14 работ, 13,0%). Ключевое преимущество ФПМ в данном контексте — продление периода сушки на несколько часов после захода солнца, что критично для доведения влажности продукта до безопасного уровня без ночного перерыва. Suherman et al. (2025) [50] разработали смешанный солнечный сушильный аппарат с рециркуляцией воздуха и ФПМ и зафиксировали снижение времени сушки на 35% по сравнению с традиционной установкой при сохранении качества продукта. Mohammed et al. (2025) [51] исследовали систему сушки на основе ФПМ с усиленным теплообменом и получили скорость сушки на 42% выше, чем у базового варианта.

Ajithkumar and Ganeshkumar (2025) [52] провели углублённое исследование влияния органического ФПМ на кинетику сушки и пищевую ценность батата: показано сохранение содержания витамина C на уровне 92% против 68% при традиционной сушке. Xie et al. (2026) [53] разработали автономную самодостаточную систему сушки с ФПМ, управляемую алгоритмом ИИ: суточная выработка тепловой энергии составила 12,4

ISSN 3030-3907

МДж/м² при КПД системы 64%. Embiale et al. (2023) [12] провели CFD-моделирование солнечной сушильной системы с двухпроходным коллектором и ФПМ: показано снижение удельных энергозатрат на сушку на 28–35%.

6.2. Обогрев зданий

Обогрев зданий с использованием СВН с ФПМ изучен в 12 работах (11,1%). Hatamleh and Abu-hamdeh (2022) [54] в численном исследовании показали, что интеграция СВН с ФПМ в вентиляционную систему здания снижает потребление вспомогательной энергии на 41% в зимний период. Alqaed (2022) [55] исследовал установку солнечного воздушного коллектора на наклонной кровле здания с ФПМ и установил снижение тепловой нагрузки на здание на 26%. Fakiri et al. (2020) [56] изучили тепловую динамику двухзонной жилой ячейки с ФПМ и без него: ФПМ снижает суточную амплитуду температур в помещении на 6,8 °C.

Zhang et al. (2025) [57] провели полномасштабный технико-экономический анализ системы на базе солнечного воздушного коллектора с ФПМ для жилого дома в Северном Китае: при капитальных затратах 4 800 $/год срок окупаемости составил 7,2 года, годовая экономия на топливе — 870 $/год, снижение выбросов CO_2 — 1,8 т/год. Ma et al. (2026) [58] экспериментально исследовали модульный солнечный аккумулятор скрытой теплоты для жилых помещений и показали, что 5-модульная система способна обеспечить суточное тепловое покрытие 68% от потребности в отопительный период.

6.3. Водоснабжение и опреснение

Применение СВН с ФПМ для водоснабжения и опреснения изучено в 5 работах (4,6%). Agrawal et al. (2023) [59] предложили систему сбора атмосферной влаги на основе солнечного коллектора с ФПМ: эффективность влагоизвлечения составила 0,8–1,2 кг/(м²·день) в условиях умеренной влажности. Agrawal et al. (2024) [60] расширили данный подход до системы атмосферного водоотбора для регионов с дефицитом пресной воды и показали суточную производительность до 1,5 кг/м² в условиях, близких к тропическим. Tiwari et al. (2024) [61] экспериментально исследовали систему опреснения методом увлажнения-осушения на основе трубчатого коллектора с ФПМ и получили суточную производительность 3,2 кг/м². Kumar et al. (2022a) [62] изучили улучшение производительности односкатной солнечной установки с применением солнечного коллектора с ФПМ и показали рост суточного производства дистиллята на 47%.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

ISSN 3030-3907

Настоящий систематический обзор охватывает 108 рецензируемых публикаций (2019–2026 гг.) по солнечным воздушным нагревателям, интегрированным с фазопеременными материалами, и является наиболее полным анализом данной тематики, выполненным в соответствии с протоколом PRISMA. На основании проведённого исследования сформулированы следующие ключевые выводы.

Публикационная активность в области СВН с ФПМ демонстрирует устойчивый экспоненциальный рост: от 3 работ до 2019 г. до 27 работ в 2025 г. (увеличение в 9 раз). Данная тенденция коррелирует с ужесточением глобальной климатической политики (COP26–COP30) и снижением стоимости солнечных технологий по данным IRENA [1–4].

По конструктивному типу абсолютно доминируют плоские однопроходные коллекторы (80,6%), тогда как двухпроходные конфигурации составляют 13,0% и обеспечивают более высокий тепловой КПД (55–75% против 40–68%). Трёхпроходные системы, представленные единственной CFD-работой с прогнозируемым КПД 76–82% [33], требуют неотложной экспериментальной верификации.

Из методов интенсификации наибольший синергетический эффект в сочетании с ФПМ демонстрируют: V-образное рифление поглощающей пластины (+38–52% по числу Нуссельта [37,38]), нанокомпозитные ФПМ (+21–61% по теплопроводности [20,43]) и струйный удар (+80–120% по коэффициенту теплоотдачи [48]). Совместное применение нескольких методов даёт синергетический эффект, превосходящий арифметическую сумму отдельных вкладов [42].

Среди ФПМ органические (парафины, жирные кислоты) остаются наиболее изученными ввиду химической стабильности, однако страдают низкой теплопроводностью (0,15–0,25 Вт/(м·К)). Нанокомпозитные ФПМ обеспечивают λ до 0,27 Вт/(м·К) и более, что открывает путь к скоростным системам аккумулирования. Солевые гидраты (λ = 0,5–0,6 Вт/(м·К)) показывают высокий эксергетический потенциал [16], однако требуют решения проблемы переохлаждения и расслоения фаз.

Приоритетными направлениями будущих исследований являются: (1) экспериментальное изучение трёхпроходных конфигураций в различных климатических условиях; (2) разработка высокотеплопроводных нанокомпозитных ФПМ с λ > 1 Вт/(м·К) без деградации Lпл; (3) долгосрочные (>500 циклов) испытания ФПМ в реальных климатических условиях, в том числе аридного климата Центральной Азии; (4) комплексный технико-экономический анализ применительно к рынкам

ISSN 3030-3907

развивающихся стран; (5) разработка стандартизованных протоколов испытаний для систем САН-ФПМ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. IRENA. Renewable Energy Statistics 2025. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2025. ISBN 9789292606756.
2. IRENA. Renewable Capacity Statistics 2025. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2025. ISBN 9789292606527.
3. IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2024. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2024. ISBN 9789292606695.
4. IRENA. Tracking Progress: Tripling Renewable Capacity and Doubling Energy Efficiency by 2030. Abu Dhabi: IRENA, 2025.
5. Hegde A.K., Pai R., Kini C.R. Performance augmentation of solar air heaters: A comprehensive analysis // Solar Energy. – 2023. – Vol. 256.
6. Kumar H., Verma M., Singh P. A detailed review of various types of solar air heaters performance // Solar Energy. – 2022. – Vol. 231. – P. 1–35.
7. Tyagi V.V., Panwar N.L., Rahim N.A., Kothari R. Review on solar air heating system with and without thermal energy storage system // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2012. – Vol. 16. – P. 2289–2303.
8. Chinnasamy V., Singh T. A review of phase change materials (PCMs) for thermal applications // Materials Today: Proceedings. – 2021.
9. Bhaisare Y., Choudhary T. et al. Sustainable latent heat storage materials in solar air heaters: A review // Thermal Science and Engineering Progress. – 2025.
10. Lee H. Climate Change 2023 Synthesis Report. IPCC, Geneva, 2023.
11. Jawad Q.A., Mahdy A.M.J. et al. Improve the performance of a solar air heater by using a PCM // Case Studies in Thermal Engineering. – 2020.
12. Embiale D.T., Gunjo D. et al. Investigation on solar drying system with double-pass solar air heater and PCM // Results in Engineering. – 2023.
13. Bora N., Dutta P.P. et al. CFD simulation of a solar air heater with double pass configuration using paraffin // Renewable Energy. – 2026.
14. Elahi M., Soudagar M. et al. Higher performance solar air dryer functioned with palmitic acid PCM // Applied Thermal Engineering. – 2025.
15. Abdulmunem A.R., Izmi I. et al. Beeswax as a sustainable thermal energy storage material // Journal of Energy Storage. – 2024. – Vol. 103. – P. 114398.
16. Venkatesh R., Logesh K. et al. Thermal and exergy analysis of solar air heater enhanced with sodium carbonate decahydrate and magnesium sulfate heptahydrate PCM // Applied Thermal Engineering. – 2025. – Vol. 258. – P. 124556.

17. Moorthy C.B., Dilip K. et al. Enhancing thermal performance of solar air heater using graphene nano coatings // Thermal Science and Engineering Progress. – 2025.
18. Ganeshkumar P., Divya S. et al. Exploring advanced solar air heating performance with trapezoidal absorber, nano-PCM // Applied Thermal Engineering. – 2025.
19. Elahi M., Soudagar M. et al. Hybrid PCM concentration on energy storage and thermal performance // Applied Thermal Engineering. – 2025.
20. Bharathiraja R., Ramkumar T. et al. Experimental and numerical analysis of hybrid nano-enhanced PCM in double-pass SAH // Journal of Energy Storage. – 2024.
21. Muthukumaran J., Senthil R. Experimental performance of a solar air heater using straight and spiral absorber tubes // Energy Science & Technology. – 2022.
22. Palacio M., Ramírez C. et al. Effect of phase-change materials in the performance of a solar air heater // Solar Energy. – 2022. (Colombia)
23. Brahma B., Kumar A. et al. Design and performance analysis of solar air heater with phase change materials // Journal of Energy Storage. – 2023.
24. Moradi H., Mirjalili S.A. et al. Performance evaluation of a solar air heating system integrated with PCM // Renewable Energy. – 2022.
25. Saad A., Cheng P., Sultan M. et al. A new design of a bifacial solar air heater with PCM // Thermal Science and Engineering Progress. – 2025.
26. Fuskele V., Lenin V.R. et al. Suitability analysis of an air heater coupled with PCM // Materials Today: Proceedings. – 2023.
27. Salih S.M., Jalil J.M. Experimental and numerical analysis of double-pass solar air heater utilizing multiple PCM // Renewable Energy. – 2019.
28. Sharol A.F., Razak A.A. et al. Effect of thermal energy storage material on the performance of double-pass solar air heater // Journal of Energy Storage. – 2022.
29. Hedau A., Singal S.K. Study on the thermal performance of double pass solar air heater with PCM // Journal of Energy Storage. – 2023.
30. Salem E., Ibrahim A. et al. Thermal performance enhancement of double-pass solar air heater // Case Studies in Thermal Engineering. – 2026.
31. Imad S., Din U. et al. Double-pass solar air heater with staggered vertical PCM cylinders // Applied Thermal Engineering. – 2025.
32. Imad S., Din U. et al. Heat transfer and flow analysis of a double-pass solar air heater with sandwich-structure PCM // Solar Energy. – 2026.
33. Abdlla H., Madadi V., Eqqab M. et al. CFD modeling of a tubular three-pass solar air heater with PCM // Journal of Energy Storage. – 2024.

ISSN 3030-3907

34. Luo Q., Li B. et al. Determination of thermal efficiency of air ETSC-PCM using artificial neural network // Expert Systems with Applications. – 2023.
35. El-fakharany M.K., Abdelmaqsoud M. et al. Enhanced performance of an integrated evacuated tube and flat plate collector with PCM // Applied Thermal Engineering. – 2024.
36. Huang S., Li W. et al. Experimental study on thermal performances of a solar chimney with and without PCM // Energy. – 2024.
37. Ganeshkumar P., Vigneswaran V.S. et al. Exploring the thermal performance of a SAH with V-corrugated and shot-blasted absorber // Journal of Energy Storage. – 2024.
38. Ameri M., Sardari R. et al. Thermal performance of a V-corrugated serpentine solar air heater with integrated PCM // Renewable Energy. – 2021.
39. Sunilraj B.A., Eswaramoorthy M. Performance study on forced convection mode V-trough solar air heater with PCM // Materials Today: Proceedings. – 2023.
40. Abdulla A.N., Alomar O.R. et al. Performance of solar air heater with jet impingement and V-corrugated absorber // Solar Compass. – 2026.
41. Chaurasiya S.K., Singh P. et al. High power and energy density of a wavy PCM unit embedded in a solar air heater // Applied Thermal Engineering. – 2024.
42. Mohammed M., Saeed A. et al. Experimental investigation on thermal performance of solar air heater using nano-PCM // Journal of Energy Storage. – 2024.
43. Kalidasan B., Pandey A.K., Rahman S. et al. Graphene–silver hybrid nanoparticle based organic PCM // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2022.
44. Sharma S.L., Debbarma A. Heat transfer analysis and melting behavior of nano composite PCM // Journal of Energy Storage. – 2024.
45. Aldabesh A. Enhancement performance of trays solar stills using vertical wicks, corrugated absorber and nano-PCM // Desalination and Water Treatment. – 2025.
46. Parsa H., Saffar-avval M. et al. Improvement of solar air heaters performance // International Journal of Mechanical Sciences. – 2023.
47. Luo Q., Li B., Wang Z. et al. A study of unidirectional spiral tube for air evacuation in a solar heater with PCM // Journal of Building Engineering. – 2022.
48. Harikrishnan M., Ajith Kumar R. et al. Integrating jet impingement and energy storage mechanisms to advance thermohydraulic performance // Journal of Energy Storage. – 2026.
49. Muthukumaran J., Senthil R. Experimental performance with straight and spiral absorbers // EST. – 2022.

ISSN 3030-3907

50. Suherman S. et al. Investigation of a mixed-mode solar dryer with air recycling system and PCM // Renewable Energy. – 2025.
51. Mohammed S.A., Alawee W.H. et al. Thermal performance enhancement of a PCM-assisted solar dryer // Case Studies in Thermal Engineering. – 2025.
52. Ajithkumar A., Ganeshkumar P. Impact of organic PCM on drying kinetics and nutritional quality // Journal of Energy Storage. – 2025.
53. Xie S., Hu J. et al. Drying performance of a self-sustained solar drying system with PCM under AI control // Energy Conversion and Management. – 2026.
54. Hatamleh R.I., Abu-hamdeh N.H. Integration of a solar air heater to a building equipped with PCM // Journal of Building Engineering. – 2022.
55. Alqaed S. Effect of using a solar hot air collector on the inclined roof of a building with PCM // Journal of Building Engineering. – 2022.
56. Fakiri H.E., Ouhsaine L. et al. Thermal dynamic behavior in bi-zone habitable cell with and without PCM // Solar Energy. – 2020.
57. Zhang J., Zhang N. et al. Feasibility analysis of a solar air collector integrated PCM for building heating // Energy & Buildings. – 2025.
58. Ma Y., Deng D.L. et al. Experimental analysis of a solar-driven modular latent heat storage system // Energy & Buildings. – 2026.
59. Agrawal A., Kumar A. Harvesting freshwater from atmospheric air using thermal energy storage enabled solar collector // Journal of Energy Storage. – 2023.
60. Agrawal A., Kumar A. Atmospheric water extraction based on solar air heater with PCM // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2024.
61. Tiwari A., Kumar A. Experimental investigation of humidification-dehumidification desalination system based on tubular collector with PCM // Journal of Energy Storage. – 2024.
62. Kumar S., Prakash O. Improving the single-slope solar still performance using solar air heater and PCM // 2022.
63. Hensel O., Rom F. A comparison of steady-state and transient models for solar air heater with PCM // Energy Conversion and Management: X. – 2022.
64. Pachori H., Choudhary T. et al. Significance of thermal energy storage material in solar air heaters // Materials Today: Proceedings. – 2022.
65. Raj A.K., Srinivas M., Jayaraj S. Transient CFD analysis of macro-encapsulated PCM in convective flow // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020.
66. Verma G., Singh S. et al. Numerical investigation on transient thermal performance of PCM integrated SAH // Journal of Energy Storage. – 2022.
67. Chaatouf D., Ghiaus A.G. et al. Experimental and numerical study of a natural convection indirect solar dryer with PCM // Solar Energy. – 2023.

ISSN 3030-3907

68. Kumar A. et al. Numerical simulation of solar air heater using paraffin wax–aluminum compound as PCM // 2021.
69. Chebaane S., Davoodabadi S. et al. ANFIS approach and thermal performance of solar air heater with PCM // Case Studies in Thermal Engineering. – 2025.
70. Nazari M.A., Mukhtar A. et al. Applications of intelligent methods in solar heaters: an updated review // Mechanics. – 2023.
71. Li S., Gong X., Ma Z. et al. Energy and exergy analysis and performance optimization of buildings integrated with PCM solar collector // Journal of Building Engineering. – 2024.
72. Zaafouri W. et al. Advancements and integration strategies of solar water heaters in buildings: a comprehensive review // Energy Nexus. – 2025.
73. Embarek N., Guellil H. et al. Experimental investigation on the influence of auxiliary heater position and wavy PCM // Applied Thermal Engineering. – 2026. (Algeria)
74. Hap N.V., Nhan P.T. et al. Numerical and experimental investigation of the solar air heater with latent heat storage // 2025. (Vietnam)
75. Diaz F.A., Moraga N.O., Castillo E. Numerical simulation of enhanced solar air heater with PCM and aluminum fins // Journal of Energy Storage. – 2025. – Vol. 109. – P. 115087. (Mexico)
76. Zadali M., Taki M. Phase change materials (PCMs) for greenhouse heating: Comprehensive review // Journal of Building Engineering. – 2025.
77. Hu W., Alekhin V.N. et al. Design, thermal performance evaluation, and economic analysis // Energy. – 2025.
78. Khadraoui A.E., Bouadila S. et al. Solar air heater with PCM: an energy analysis and comparative study // Applied Thermal Engineering. – 2016.
79. Salih S.M. et al. Flat solar air heater collector with PCM for domestic purposes in Iraq // (n.d.)
80. Singh A.K., Agarwal N. et al. Effect of extended geometry filled with and without PCM // Journal of Energy Storage. – 2021.
81. Singh S., Negi B.S. Numerical thermal performance of PCM integrated wavy solar air heater // Journal of Energy Storage. – 2020.
82. Farzan H., Hasan E. Performance investigation on a new solar air heater using PCM // Journal of Energy Storage. – 2022.
83. Farzan H., Hasan E. et al. Performance study on a new solar air heater with integrated PCM and fins // Applied Thermal Engineering. – 2023.
84. Farzan H., Hasan E. et al. Study on thermal performance of a new combined perforated metallic/asphalt SAH // Solar Energy. – 2023.
85. Farzan H., Mahmoudi M. et al. Study on energy and exergy performance of a new hybrid perforated PV/SAH // Solar Energy. – 2024.

ISSN 3030-3907

86. Bo R., Hu C., Fu W. et al. Influence of nocturnal thermal insulation on thermal performance of SAH with PCM // Case Studies in Thermal Engineering. – 2023.
87. Lu S., Zheng J., Wang R. et al. Thermal performance of a novel coupled heating system combining SAH with PCM // Solar Energy. – 2023.
88. Imad S., Din U. et al. Thermohydraulic performance optimization of a novel double-pass SAH // Case Studies in Thermal Engineering. – 2025.
89. Imad S., Din U. et al. Performance analysis of a photovoltaic double-pass SAH with staggered zig-zag PCM // Journal of Energy Storage. – 2025.
90. Hedau A., Singal S.K. Thermo-hydraulic performance of double pass SAH integrated with PCM // Journal of Energy Storage. – 2024.
91. Hedau A., Singal S.K. Heat transfer and fluid flow analysis of PCM-based thermal energy storage // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2024.
92. Rawat P., Faizan A. Optimization of single and double pass solar air heater with PCM // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2024.
93. Rehman T., Dinh D. et al. Smart optimization and investigation of a PCMs-filled helical finned-tubes double-pass SAH // Thermal Science and Engineering Progress. – 2024.
94. Saxena A., Cuce E. et al. Experimental studies of latent heat storage based solar air heater for space heating // Journal of Building Engineering. – 2023.
95. Chaurasiya S.K. et al. High power and energy density of wavy PCM unit // Applied Thermal Engineering. – 2024.
96. Dinesh S.N., Saminathan R. et al. Investigating the single pass baffled solar air heater with PCM // Materials Today: Proceedings. – 2022.
97. Afshari F., Ceviz M.A. et al. Solar-assisted PCM system for efficient cabin heating in electric vehicles // Applied Thermal Engineering. – 2025.
98. Khalid A., Hassanain M. et al. Performance enhancement of Tri-Path desiccant air conditioning using solar energy and PCM // Applied Thermal Engineering. – 2025.
99. Saleh M., Jahromi B. et al. Evaluation of performance, energy, and exergy analysis of a solar parabolic dish with PCM // Journal of Energy Storage. – 2024.
100. Madadi V., Abdlla H. et al. Enhancing thermal and exergetic performance of solar air heating systems with PCM // Energy. – 2025.
101. Ata I., Erkam Y. Experimental analysis of SAH with PCM // Engineering Science and Technology. – 2025.
102. Ahirwar B. Review on different techniques used to improve solar air heater performance // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2024.

ISSN 3030-3907

103. Vengadesan E., Dhinakaran V. et al. Performance augmentation of solar air heater using absorber with multi-functional encapsulated PCM // Journal of Energy Storage. – 2023.
104. Nagale V.D., Singh S. et al. Design of a recyclic solar air heater for low temperature regions with PCM // Applied Thermal Engineering. – 2023.
105. Patel V., Judal K.B., Sharma A. et al. Effect of channel depth ratio and absorber plate with PCM // Case Studies in Thermal Engineering. – 2024.
106. Jafari F., Semprini G. et al. Evaluating the impact of recycled ceramic-PCM compound in solar air heater // Applied Thermal Engineering. – 2025.
107. Wang X., Yuan H., Mei N. et al. Anti-frosting air source heat pump integrated with condensation heat recovery and PCM // Energy. – 2026.
108. Zhu C., Dong X., Wan W. et al. Experimental thermal performance of air-type solar collector with PCM // Journal of Energy Storage. – 2024.

ISSN 3030-3907