СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛОСКИХ И ВАКУУМНЫХ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ.

Зохирова Шахноза Муродиллаевна
Старший преподователь, Каршинский гос. Университет, Узбекистан
E-mail: Zokhirova.sh@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются конструкция, принцип действия и энергетическая эффективность различных типов солнечных коллекторов, применяемых для преобразования солнечной радиации в тепловую энергию. Особое внимание уделено плоским и вакуумным коллекторам, их оптическим и тепловым характеристикам, а также факторам, влияющим на величину КПД. Показана роль абсорбера, прозрачного покрытия и теплоизоляции в снижении теплопотерь. Рассмотрены зависимости полезной теплоты, оптического КПД, коэффициента теплопотерь и предельно достижимой температуры коллектора. Описаны виды селективных покрытий и их влияние на эффективность вакуумных коллекторов.

Ключевые слова: солнечный коллектор; плоский коллектор; вакуумный коллектор; абсорбер; селективное покрытие; солнечная радиация; тепловой КПД; оптический КПД; теплопотери; коэффициент теплопередачи; теплоноситель.

Annotatsiya. Ushbu maqolada quyosh nurlanishini issiqlik energiyasiga aylantirish uchun ishlatiladigan turli xil quyosh kollektorlarining konstruktsiyasi, ishlash printsipi va energiya samaradorligi ko‘rib chiqiladi. Yassi va vakuum trubkali kollektorlarga, ularning optik va issiqlik xususiyatlariga hamda samaradorlikka ta'sir qiluvchi omillarga alohida e’tibor qaratiladi. Issiqlik yo‘qotilishini kamaytirishda absorber, shaffof qoplama va issiqlik izolyatsiyasining roli ko‘rsatilgan.

Foydali issiqlik, optik samaradorlik, issiqlik yo‘qotish koeffitsienti va kollektorning maksimal erishiladigan haroratiga bog‘liqliklari ko‘rib chiqiladi. Selektiv qoplamalarning turlari va ularning vakuum kollektorlarining samaradorligiga ta’siri tavsiflangan.

Kalit so‘zlar: quyosh kollektori; yassi kollektor; vakuum kollektor; absorber; selektiv qoplama; quyosh nurlanishi; issiqlik samaradorligi (FIK); optik samaradorlik(FIK); issiqlik yo‘qotilishi; issiqlik uzatish koeffitsienti; issiqlik tashuvchi.

Abstract. This article examines the design, operating principle, and energy efficiency of various types of solar collectors used to convert solar radiation into thermal energy. Particular attention is paid to flat-plate and evacuated tube collectors, their optical and thermal characteristics, and factors affecting efficiency.

ISSN 3030-3907

The role of the absorber, transparent coating, and thermal insulation in reducing heat loss is demonstrated. The dependencies of useful heat, optical efficiency, heat loss coefficient, and the maximum achievable temperature of the collector are considered. Types of selective coatings and their impact on the efficiency of evacuated tube collectors are described.

Keywords: solar collector; flat-plate collector; evacuated tube collector; absorber; selective coating; solar radiation; thermal efficiency; optical efficiency; heat loss; heat transfer coefficient; coolant.

ВВЕДЕНИЕ.

В условиях роста потребности в возобновляемых источниках энергии солнечная энергетика занимает одно из ключевых направлений развития современных теплоэнергетических систем. Солнечные коллекторы представляют собой технические устройства, предназначенные для преобразования солнечной радиации в тепловую энергию, которая затем используется в бытовых, технологических и энергетических установках. Благодаря экологичности, простоте эксплуатации и высокой эффективности такие устройства получили широкое распространение в гелиотермических системах различного назначения.

Существует два основных типа солнечных коллекторов - плоские и фокусирующие, которые отличаются способом улавливания и преобразования солнечной радиации. Наиболее популярными в низкотемпературных установках являются плоские солнечные коллекторы, работающие на основе парникового эффекта. Их конструкция включает абсорбер, прозрачное покрытие и теплоизоляционный слой, обеспечивающие эффективное поглощение излучения и минимизацию теплопотерь. Для получения более высоких температур применяются вакуумные коллекторы, в которых тепловые потери значительно снижены за счёт вакуумированной среды и использования селективных покрытий.

Изучение процессов теплопередачи, оптических свойств материалов и влияния конструктивных параметров на КПД солнечных коллекторов имеет важное значение для повышения эффективности гелиотермических систем. В данной работе рассматриваются принципы работы, конструктивные особенности и основные энергетические характеристики плоских и вакуумных солнечных коллекторов, а также факторы, определяющие их тепловую и оптическую эффективность.

Вопросы повышения эффективности солнечных тепловых установок активно исследуются как отечественными, так и зарубежными авторами. Ряд фундаментальных трудов посвящён изучению физических процессов,

ISSN 3030-3907

протекающих в солнечных коллекторах, а также влиянию конструктивных и эксплуатационных факторов на их энергетическую производительность.

В классических работах Дубинина и Копылова [4] рассматриваются принципы преобразования солнечной радиации в тепловую энергию, классификация солнечных коллекторов, а также особенности работы плоских солнечных систем, получивших широкое распространение в бытовой и промышленной теплогенерации. Авторы подчёркивают важность выбора материалов для абсорбера и остекления, так как именно эти элементы в значительной степени определяют оптический КПД коллектора.

Основы теплотехнических процессов, происходящих в гелиоустановках, детально изложены в работах Кудрявцева [2] и Яшина [6]. Эти авторы подробно анализируют механизмы теплопотерь - конвективных, кондуктивных и радиационных - и приводят методы их снижения за счёт улучшения теплоизоляции и применения селективных покрытий. Особое внимание уделяется роли коэффициента теплопередачи и его влиянию на общий КПД солнечного коллектора.

Существенный вклад в развитие теории оптических свойств солнечных коллекторов внесён Тарасовым [7], который исследовал влияние угла падения солнечных лучей на пропускание остекления и отражательные потери. В его работах представлены современные подходы к созданию высокоэффективных селективных покрытий, обладающих высоким коэффициентом поглощения и низкой степенью излучения, что позволяет существенно повысить рабочую температуру вакуумных коллекторов.

Зарубежные авторы также уделяют большое внимание моделированию процессов теплообмена в солнечных системах. Так, Duffie и Beckman [5] представляют обширную математическую базу для расчёта солнечных коллекторов, включая модели оптических потерь, теплового сопротивления, динамики теплоносителя и энергетического баланса.

На основе анализа работ различных авторов можно сделать вывод, что основными направлениями совершенствования солнечных коллекторов являются:

- разработка высокоселективных поглощающих покрытий;
- улучшение свойств прозрачного покрытия и снижение отражательных потерь;
- повышение качества теплоизоляции;
- оптимизация конструкции трубчатых и плоских абсорберов;
- моделирование и прогнозирование реальных тепловых режимов работы систем.

ISSN 3030-3907

Современная литература подчёркивает, что сочетание этих подходов позволяет добиться значительного повышения КПД солнечных тепловых систем, особенно в условиях высоких температур и переменной солнечной активности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.

Технические устройства, предназначенные для улавливания солнечного излучения, его преобразования в тепловую энергию и передачи этого тепла промежуточному теплоносителю, который далее направляется в теплопотребляющие технологические или энергетические установки, называют солнечными коллекторами.

Выделяют два основных вида таких коллекторов - плоские и концентрирующие. В плоских устройствах солнечная энергия поглощается без увеличения плотности потока, тогда как в фокусирующих применяется концентрация лучей, что позволяет получить более высокую интенсивность излучения. В установках, работающих при сравнительно низких температурах, чаще всего используют плоские солнечные коллекторы (КСЭ). Их функционирование основано на принципе «солнечного ящика» или парникового эффекта. Схема плоского КСЭ представлена на рисунке 1.

Основная часть солнечной энергии переносится видимым светом, а меньшая - инфракрасным излучением. Световые лучи свободно проходят через верхнее прозрачное покрытие коллектора, выполненное из стекла или полимерной плёнки, и поглощаются на специальной лучепоглощающей поверхности. Эта поверхность изготавливается из материала с высокой теплопроводностью и значительным коэффициентом поглощения [1].

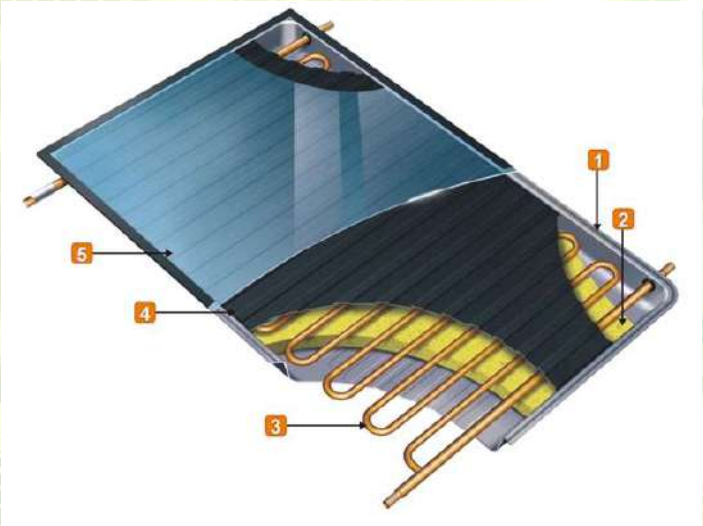


Рис. 1. Корпус коллектора, 2. Термоизоляция из минеральной ваты, 3. Абсорбер, изготовленный из медного или алюминиевого листа, 4. Стеклянная крышка с покрытием, уменьшающим теплопотери.

ISSN 3030-3907

Плоский солнечный коллектор включает в себя несколько основных элементов: абсорбер, улавливающий солнечное излучение, прозрачное защитное покрытие и слой тепловой изоляции. В прямоугольном корпусе, изготовленном из металла или алюминиевого сплава, размещается теплоприёмная часть - металлическая пластина, внутри которой запрессован медный трубчатый змеевик. Такая пластина обычно выполняется из меди или алюминия и покрывается тёмным абсорбционным слоем.

С нижней стороны эта пластина отделена от основания коллектора теплоизоляционным материалом, а в качестве верхнего покрытия используется прочное стекло либо поликарбонат. Трубки, по которым циркулирует теплоноситель, плотно соприкасаются с пластиной, что обеспечивает эффективный тепловой обмен. Комбинация плоской поглощающей поверхности и трубопроводов для теплоносителя образует единый узел - солнечный абсорбер. Для повышения эффективности поглощения солнечной энергии верхняя часть абсорбера окрашивается в чёрный цвет или покрывается специальным селективным слоем.

При нагревании абсорбер начинает отдавать тепловую энергию внутренним поверхностям коллектора. Поскольку температура его поверхности относительно невысока, основная часть излучения приходится на инфракрасный диапазон, который почти не проходит через стеклянное покрытие. Чтобы сократить теплопотери, по бокам и в нижней части коллектора устанавливают толстые слои теплоизоляции.

Основной характеристикой КСЭ является его тепловой КПД, показывающий, какая доля солнечной энергии $Q_{л}$, падающей на коллектор, передается в форме тепла $Q_{пол}$ потребителю. Для расчета тепловой КПД можно использовать формулу предложенной Duffie и Beckman [1]:

$$\eta_{т} = \frac{Q_{пол}}{Q_{л}} = \frac{M_{т} c_{т} (t_2 - t_1)}{Q_{л}} \quad (1)$$

где $Q_{пол} = Q_{л} - Q_{пот}$,

Поскольку количество полезного тепла определяется разностью между $Q_{л}$ и теплопотерями $Q_{пот}$, которые в свою очередь могут быть рассчитаны по известной формуле

$$Q_{пот} = kF(t_a - t_o) \quad (2)$$

k – средний эффективный коэффициент теплопередачи; F – площадь теплоотдающей поверхности; t_a и t_o – средняя температура поверхности абсорбера и температура окружающей среды, соответственно; $M_{т}$ – массовый расход теплоносителя через КСЭ; $c_{т}$ – удельная теплоемкость теплоносителя; t_1 и t_2 – температуры теплоносителя на входе и выходе из КСЭ [1,6].

ISSN 3030-3907

Оптический коэффициент полезного действия коллектора характеризует ту часть солнечного излучения, которая, пройдя через прозрачное покрытие, фактически поглощается абсорбером. Это значение определяется двумя параметрами: коэффициентом пропускания стекла α и коэффициентом поглощения поверхности абсорбера β. Для коллектора с однослойным остеклением оптический КПД выражается формулой:

$$\eta_0 = (\alpha\beta)_н \quad (3)$$

Где $(\alpha\beta)_н$ – произведение названных коэффициентов при нормальном к поверхности стекла и абсорбера падении солнечных лучей. В случае, когда угол падения лучей отличается от прямого, вводится поправочный множитель *K*, учитывающий увеличение потерь на отражение лучей. На рис. 2 приведен график зависимости этого коэффициента от угла θ между направлением луча и нормалью к поверхности остекления [1].

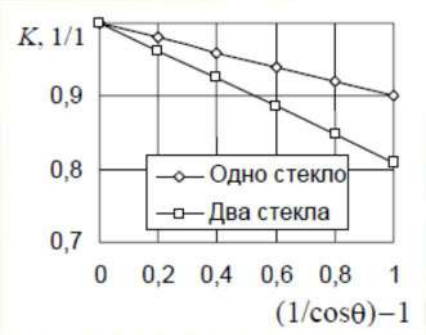


Рис. 2. Поправочный коэффициент, учитывающий увеличение потерь на отражение лучей.

С учетом угла падения лучей оптический КПД определяется по Формуле

$$\eta_0 = K(\alpha\beta)_н \quad (4)$$

Оптический и тепловой КПД связаны соотношением

$$\eta_т = \eta_0 - \frac{Q_{пот}}{I\Omega} \quad (5)$$

где $Q_{пот}$ – тепловые потери коллектора; *I* – плотность потока солнечной радиации; Ω–площадь апертуры коллектора.

Тепловые потери характеризуются величиной коэффициента теплопотерь *U*

$$U = \frac{Q_{пот}}{\Omega(t_a - t_o)} \quad (6)$$

Величина *U* определяется качеством теплоизоляции и с достаточной для расчетов точностью для каждого вида коллекторов может считаться постоянной. Если выразить отсюда $Q_{пот}$ и подставить это выражение в предыдущую формулу, то получим

$$\eta_т = \eta_0 - \frac{U(t_a - t_o)}{I} \quad (7)$$

ISSN 3030-3907

Откуда видно, что с увеличением t_a величина $\eta_т$ уменьшается. При некотором значении t_a КПД коллектора может стать равным нулю, и эта температура является предельно достижимой для данного коллектора [1,4].

Плоские солнечные коллекторы используют обычно в системах, где уровень нагрева теплоносителя не превышает 80 … 90 ^{0}C. Для нагрева до более высоких температур используют вакуумные коллекторы. В них абсорбирующая поверхность отделена от окружающей среды вакуумированным пространством, что позволяет значительно уменьшить потери теплоты в окружающую среду за счет исключения теплопроводности и конвекции. При этом потери излучением в значительной степени подавляются применением селективных покрытий, поглощение которых во много раз выше, чем излучение. Вакуумные коллекторы, схемы конструктивного выполнения которых приведены на рис. 3, позволяют нагревать теплоносители до 120 … 150 ^{0}C и выше.

Вакуумированный коллектор состоит из стеклянного корпуса (трубка диаметром 100 … 150 мм), внутри которой размещаются лучевоспринимающая поверхность с селективным покрытием и трубки для теплоносителя прямой или *U*-образной формы (или вместо их тепловые трубки). Пространство внутри стеклянного корпуса вакуумируется до давления 0,01 мм. рт. ст., что практически полностью исключает теплопроводность и конвекцию внутри коллектора. Обычно трубчатые коллекторы монтируются отдельными модулями по 10 труб.

Эффективность работы вакуумных коллекторов зависит от оптических свойств селективной поверхности абсорбера. По избирательности свойств различают четыре группы селективных покрытий: собственные, двухслойные, смикрорельефом, обеспечивающим аналогичный эффект и интерференционные.

Собственной избирательностью оптических свойств обладает небольшое число материалов, поэтому наибольшее применение получили двухслойные селективные пленочные покрытия. На поверхность, которой нужно придать селективные свойства, наносится слой с большим коэффициентом отражения в длинноволновой области, например медь, никель, молибден, серебро, алюминий. Сверху этого слоя наносится слой, прозрачный для излучения в длинноволновой области, но имеющий большой коэффициент поглощения в видимой части спектра. Такими свойствами обладают многие оксиды. Простейший пример получения двухслойной селективной поверхности – это окисление поверхности названных металлов. Наилучшие результаты получены, например, для пленок с черным хромом на

ISSN 3030-3907

алюминиевой фольге, с черным никелем на никелевой подложке (коэффициент поглощения α = 0,96, степень черноты ε= 0,07). Отношение α/ε называют степенью селективности, при α / ε > 30 равновесная температура вакуумного абсорбера (без теплоносителя) может достигать 350 … 600 ^{0}C [1,2].

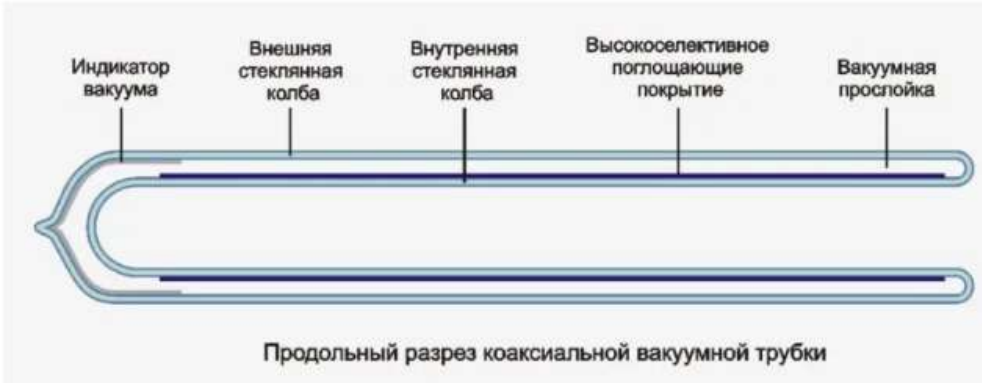


Рис. 3. Схема вакуумного коллектора

Селективность поверхности может быть обеспечена за счет геометрических факторов. Для этого микронеровности поверхности должны быть больше длины волны в видимой области спектра и меньше длины волны в инфракрасном диапазоне. Такая поверхность для первой области будет черной, а для второй – зеркальной. Подобными селективными свойствами обладают также тела с пористой структурой при соответствующих размерах пор.

Интерференционные селективные поверхности образуются несколькими перемежающимися слоями металла и диэлектрика, в которых коротковолновое излучение гасится за счет интерференции, а длинноволновое – свободно отражается.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.

В ходе анализа плоских и вакуумных солнечных коллекторов были выявлены ключевые особенности, влияющие на их эффективность. Для плоских коллекторов основной фактор, определяющий тепловой КПД, - это качество абсорбирующей поверхности и эффективность теплоизоляции. Толстые слои теплоизоляции снижают теплопотери через нижнюю и боковые поверхности, а использование черного или селективного покрытия на абсорбере повышает поглощение солнечной радиации. Оптический КПД в значительной степени зависит от прозрачного покрытия и угла падения солнечных лучей, что подтверждается расчетами по формулам.

В результате анализа работы плоских и вакуумных солнечных коллекторов были получены следующие данные.

ISSN 3030-3907

Пример расчета полезного тепла для плоского коллектора: Массовый расход теплоносителя $M_t = 0{,}05$ кг/с, удельная теплоёмкость теплоносителя $c_t = 4200$ Дж/(кг·^{0}C), температура на входе t_1=25 ^{0}C, температура на выходе t_2=50 ^{0}C

Расчет полезного тепла:

$$Q_{\text{пол}} = M_{\text{т}} c_{\text{т}} (t_2 - t_1) = 0{,}05 \cdot 4200 \cdot (50 - 25) = 5250\text{Дж/с} = 5{,}25\text{квт}$$

Если солнечное излучение $Q_{\text{л}}$=7 кВт, то тепловой КПД коллектора:

$$\eta_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{пол}}}{Q} = \frac{5{,}25}{7} \approx 0{,}75$$

Таблица 1.

Сравнение характеристик плоского и вакуумного коллекторов

Параметр	Плоский коллектор	Вакуумный коллектор
Максимальная температура теплоносителя, °C	80–90	120–150
Тепловой КПД, %	60–75	70–90
Теплопотери	Средние	Низкие
Применение	Низкотемпературные системы	Средне- и высокотемпературные системы
Стоимость	Низкая	Высокая

Вакуумные коллекторы показывают значительно более высокие показатели тепловой эффективности благодаря снижению теплопотерь за счет вакуумированной среды. Применение селективных покрытий позволяет повысить коэффициент поглощения солнечной энергии и одновременно снизить собственное излучение абсорбера. В результате теплоноситель может нагреваться до более высоких температур, достигая 120–150 °C и выше, что делает вакуумные коллекторы предпочтительными для среднетемпературных гелиоустановок.

Сравнительный анализ показывает, что при одинаковой площади коллектора вакуумные устройства обеспечивают больший выход полезной энергии, особенно в условиях низкой солнечной активности или при необходимости нагрева теплоносителя до высоких температур. Плоские коллекторы, в свою очередь, остаются оптимальными для

ISSN 3030-3907

низкотемпературных систем, где простота конструкции и невысокая стоимость имеют решающее значение.

Таким образом, эффективность работы солнечного коллектора определяется комплексом факторов: конструктивными особенностями абсорбера, свойствами прозрачного покрытия, качеством теплоизоляции и оптическими характеристиками материалов. Оптимизация этих параметров позволяет существенно повысить общий КПД системы и снизить эксплуатационные теплопотери.

Из расчета видно, что вакуумные коллекторы обеспечивают более высокую температуру теплоносителя и меньшие теплопотери по сравнению с плоскими. Однако плоские коллекторы остаются экономически более выгодными и простыми в установке для систем с низкой температурой нагрева.

Комбинация данных расчетов и таблицы позволяет наглядно сравнить эффективность различных типов солнечных коллекторов и определить оптимальный вариант для конкретной системы.

Таблица 2.

КПД плоского и вакуумного коллекторов в зависимости от температуры теплоносителя

t_a (^{0}C)	КПД плоского, %	КПД вакуумного, %
30	78	85
50	72	83
70	65	80
90	58	78
110	-	74
130	-	70

Из таблицы видно, что КПД плоского коллектора резко падает при повышении температуры, тогда как вакуумный коллектор сохраняет высокий КПД на более широком диапазоне температур.

ISSN 3030-3907

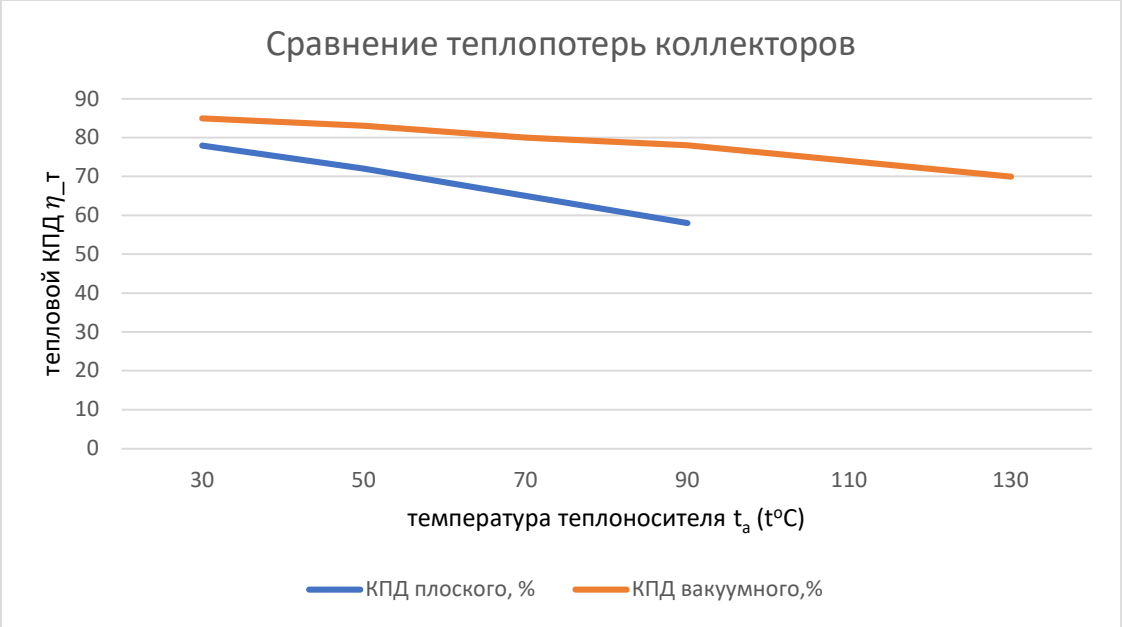


Диаграмма 1. Сравнение теплопотерь коллекторов

Плоский коллектор: теплопотери около 25%, вакуумный коллектор: теплопотери около 10%.

Эта диаграмма визуально показывает преимущество вакуумного коллектора в снижении теплопотерь.

ВЫВОДЫ.

Проведённый анализ конструктивных особенностей и принципов функционирования солнечных коллекторов показал, что их эффективность в значительной степени определяется качеством поглощающей поверхности, оптическими свойствами остекления и величиной теплопотерь. Плоские солнечные коллекторы являются наиболее распространёнными в низкотемпературных гелиоустановках благодаря простоте конструкции и надёжности работы. Они обеспечивают приемлемый уровень нагрева теплоносителя при условии применения эффективной теплоизоляции и высокопоглощающих покрытий.

Вакуумные коллекторы обладают существенно меньшими теплопотерями за счёт создания вакуумированной среды между абсорбером и окружающей средой. Использование селективных покрытий позволяет значительно повысить коэффициент поглощения и уменьшить собственное тепловое излучение, что обеспечивает достижение высоких температур теплоносителя. Таким образом, выбор типа коллектора должен основываться на требуемых температурных режимах, климатических условиях и экономических факторах.

В целом, дальнейшее совершенствование солнечных коллекторов связано с развитием новых селективных покрытий, улучшением

ISSN 3030-3907

теплоизоляционных материалов и оптимизацией оптических характеристик прозрачных элементов, что позволит повысить общий КПД гелиотермических систем.

ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.И. Ляшков, С.Н. Кузьмин. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Учебное пособие. – Тамбов: Изд-во Тамб. Гос. Техн. Ун-та, 2003. – 96 с.
2. Кудрявцев В. М. Возобновляемые источники энергии: учебное пособие. - Санкт-Петербург: Питер, 2019. - 256 с.
3. Кошелев А. А., Самойлов В. В. Основы гелиоэнергетики. - Новосибирск: СибУП, 2020. -198 с.
4. Дубинин Н. Е., Копылов И. П. Солнечные коллекторы и гелиотермические системы. - Москва: Энергоатомиздат, 2018. - 312 с.
5. Duffie J. A., Beckman W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. - Wiley, 2013. - 650 p.
6. Яшин В. В. Теплотехнические расчёты солнечных коллекторов. - Москва: Машиностроение, 2017. - 220 с.
7. Тарасов Ю. А. Гелиотехника: теория и практика. - Екатеринбург: УрФУ, 2021. - 310 с.

ISSN 3030-3907