

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СВЕТОВЫХ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНЫМИ КОЛЛЕКТОРАМИ

А. В. ФРОЛОВ

ЦЗФО, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, УКРАИНА
email: frolov_a@inbox.ru

АНОТАЦІЯ Презентована стаття присвячена аналізу та оцінці ефективності перетворення сонячної енергії колекторами, які вигідно відрізняються від традиційних кремнієвих сонячних батарей істотно більшими ККД. Залежно від рівня сонячної інсоляції ККД колекторів становлять від 40 до 80%, а максимальні ККД кремнієвих панелей не перевищують 17-20%. На основі рівняння енергетичного балансу визначені фактори, що визначають ефективність перетворення колекторами енергії сонячного потоку в теплову. Показано, що потік оптимальних значень цих факторів доцільно виконувати застосовуючи методики багатofакторної оптимізації.

Ключові слова: сонячний колектор, інсоляція, площа колектора, коефіцієнт корисної дії, термодинамічні параметри, оптимізація.

АННОТАЦИЯ Представленная статья посвящена анализу и оценке эффективности преобразования солнечной энергии коллекторами, которые выгодно отличаются от традиционных кремниевых солнечных батарей существенно большими КПД. В зависимости от уровня солнечной инсоляции КПД коллекторов составляют от 40 до 80 %, а максимальные КПД кремниевых панелей не превышают 17-20 %. На основе уравнения энергетического баланса определены факторы, определяющие эффективность преобразования коллекторами энергии солнечного потока в тепловую. Показано, что поток оптимальных значений этих факторов целесообразно выполнять применяя методики многофакторной оптимизации.

Ключевые слова: солнечный коллектор, инсоляция, площадь коллектора, коэффициент полезного действия, термодинамические параметры, оптимизация.

EVALUATION EFFECTIVENESS OF TRANSFORMATION LUMINOUS FLUX OF SOLAR COLLECTORS

A. FROLOV

Center for correspondence courses, Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT In the article conducted evaluation effectiveness of transformation luminous flux of solar collectors. The purpose for optimize operation of the solar collector is to increase its efficiency, and this should improve the efficiency of absorption of solar emission and reduce heat loss. Maximum efficiency is achieved between when the temperature absorber difference and the environment and the thermal losses are zero. Presented article analyzes the efficiency of conversion solar energy by collectors that compares favorably from the traditional silicon solar cells significantly greater coefficient of efficiency. Depending on the level of insolation collector efficiency ranged from 40 to 80%, and the maximum efficiency of silicon panels does not exceed 17-20%. On the basis of the energy balance equation we identified the factors that determine the conversion efficiency of energy of solar flux by collectors. Also, in the presented article we show that the flow of optimal values of these factors it is advisable to perform the technique using multivariate optimization. Taking into account the statistical data for the last 30 years defined operating modes of (air temperature and the level of solar insolation) collectors at different times of the year for the Kharkiv region. Thus we determined: calculation of the effectiveness is advisable to perform using a multi-factor mathematical model by multi-criteria optimization; the most efficient mode of operation of solar collectors are modes with minimum difference between the ambient temperature and the temperature of absorber. During selecting and designing the collector arrays for year-round operation modes of the solar installation, you must take into account the difference in the maximum and minimum levels of solar insolation. At the same time, the efficiency of the vacuum collectors is less dependent on ambient temperature changes than using flat collectors.

Keywords: solar collector, insolation, collector area, coefficient of efficiency, thermodynamic parameters, optimization.

Введение

В настоящее время для целей теплоснабжения интенсивно расходуются органические виды топлива, не смотря на то, что в современном мире их использование связано с рядом проблем: постоянный рост цен, зависимость от поставок, высокие

эксплуатационные затраты на оборудование, загрязнение окружающей среды.

По прогнозам ученых-аналитиков, после исчерпания на Земле органических видов топлива (нефти, газа и угля) наибольшим источником энергии для человечества останется Солнце, которое прослужит цивилизации, по меньшей мере, 3-4 млрд. лет. И еще одна цифра - годовое количество энергии,

поступающей от Солнца, почти в 15 тыс. раз превышает количество энергии, расходуемой населением Земли для обеспечения всей хозяйственной деятельности. По сравнению с этим потенциалом имеющиеся в нашем наличии ресурсы полезных ископаемых и ядерные энергетические источники кажутся незначительными. Вся потребность человечества в энергии на 180 лет вперед может быть обеспечена солнечной энергией, которая достигает Земли только за один день. В численном выражении Солнце посылает Земле ежедневно 960 миллиардов киловатт энергии.

Поэтому все больше внимания уделяется использованию нетрадиционных источников энергии, к которым относятся гелиосистемы.

В последнее время наиболее распространенным является вариант использования солнечных устройств на основе гелиоколлекторов. При этом акцент сделан на создание энергетических комплексов, включающих как традиционное котельное оборудование, так и гелиоколлекторы.

Как правило, степень нагрева в гелиоколлекторах (в наиболее совершенных конструкциях при хороших метеоусловиях) не превышает 70-80 °С. При снижении уровня инсоляции наблюдается снижение эффективности нагрева теплоносителя, что приводит к необходимости ввода в эксплуатацию котельного оборудования.

С помощью систем солнечных коллекторов при стандартном расчете потребности можно покрывать около 60% потребности в теплой воде жилого дома, рассчитанного на одну/две семьи. В теплый период, который составляет полгода, за счет солнечной энергии можно покрывать почти всю потребность в тепловой энергии.

Системы солнечных коллекторов наряду с функцией подогрева воды за счет использования солнечной энергии предназначены также для нагрева воды, используемой в отопительных системах.

Гелиоустановка практически не требует обслуживания и представляет собой инвестиции в будущее с четко просчитываемой окупаемостью.

Как отмечается в [1, 2] при постоянном росте цен на энергосистемы очень выгодным становится использование солнечных коллекторов для теплоснабжения фермерских домов. В этом случае гелиоустановки могут обеспечить потребности частного дома фермера в энергии для подогрева воды и частного отопления.

Солнечные установки для нагрева воды являются «экологически выгодной» альтернативой традиционным системам, они надежны и удобны в обслуживании, а главное – дают возможность экономить традиционные энергоресурсы. На подогреве воды можно экономить до 50-60% за год, а в летние месяцы экономия может достигать до 85-90%.

Цель работы

Целью работы является анализ и оценка эффективности преобразования солнечной энергии коллекторами, которые выгодно отличаются от традиционных кремниевых солнечных батарей существенно большими КПД.

Изложение основного материала

Главными элементами установки с солнечными коллекторами являются коллектор и аккумулятор, а также теплообменник, механизмы для циркуляции теплоносителя, автоматические устройства и регуляторы [1, 3].

Схема установки горячего водоснабжения с солнечными коллекторами показана на рис.1

1 - коллектор; 2 - воздухоотводчик; 3 - датчик температуры коллектора; 4 - система управления солнечными коллекторами; 5 - насосно арматурная группа; 6 - датчик температуры водонагревателя устройства регулирования гелиосистемы; 7 - кран для подпитки и слива; 8 - бивалентный водонагреватель; 9 - котел на жидком топливе или газе с автоматикой; 10 - датчик температуры водонагревателя от системы отопления.

Математическую модель солнечного коллектора представляем уравнением теплового баланса, формулами для определения коэффициента полезного действия коллектора и для вычисления площади поглощающей поверхности коллектора.

Уравнение теплового баланса для солнечного коллектора:

$$q_1 + q_2 = q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7 + q_8. \quad (1)$$

Поток тепла, уносимый теплоносителем к аккумулятору тепла для системы горячего водоснабжения или в систему отопления (полезная тепловая мощность):

$$q_3 = q_1 + q_2 - q_4 - q_5 - q_6 - q_7 - q_8, \quad (2)$$

где q_1 - тепловой поток прямого солнечного излучения, Вт/с; q_2 - тепловой поток рассеянного солнечного излучения, Вт/с; q_3 - тепловой поток, уносимый теплоносителем для горячего водоснабжения или отопления, Вт/с; q_4 - потери тепла с отраженным солнечным излучением, Вт; q_5 - тепловые потери через заднюю и боковые стенки солнечного коллектора (вследствие теплопроводности), Вт; q_6 - потери тепла вследствие конвекции, Вт; q_7 - потери тепла в результате теплового излучения абсорбера, Вт; q_8 - потери тепла в результате теплового излучения защитного стекла, Вт.

Основная характеристика коллектора — коэффициент полезного действия η . Он показывает какая доля солнечного излучения, падающего на

коллектор, может быть преобразована в полезную тепловую мощность.

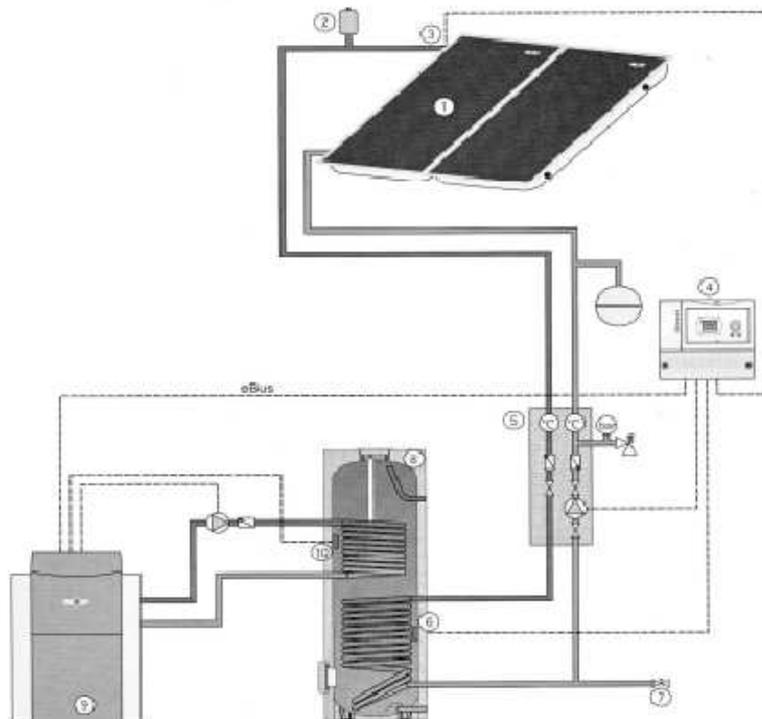


Рис.1 – Схема установки горячего водоснабжения с солнечными коллекторами

где 1 - коллектор; 2 - воздухоотводчик; 3 - датчик температуры коллектора; 4 - система управления солнечными коллекторами; 5 - насосно арматурная группа; 6 - датчик температуры водонагревателя устройства регулирования гелиосистемы; 7 - кран для подпитки и слива; 8 - бивалентный водонагреватель; 9 - котел на жидком топливе или газе с автоматикой; 10 - датчик температуры водонагревателя от системы отопления.

В физическом смысле КПД выражает отношение «полезной» тепловой энергии, отведенной от абсорбера с помощью циркулирующего через коллектор теплоноситель, к падающей на абсорбер суммарной лучистой энергии.

$$\eta = \frac{q_3}{q_1 + q_2} \quad (3)$$

Для определения КПД коллектора используется формула [7]:

$$\eta = \frac{\eta_0 - (k_1 - \Delta T)}{E - \frac{(k_2 - \Delta T)^2}{E}} \quad (4)$$

где η_0 - оптический коэффициент полезного действия коллектора; k_1 и k_2 - коэффициент тепловых потерь; $\Delta T = (T_n - T_o)$; T_n - температура поглотителя, K ; T_o - температура окружающей среды; E - интенсивность облучения, Вт/м².

Оптический КПД равен произведению пропускной способности стекла и поглощательной способности абсорбера при ($\eta_0 = \eta_0$ при $\Delta T = 0$).

Потери тепла при работе коллектора рассчитываются по коэффициентам тепловых потерь k_1 и k_2 и по разности температур между поглотителем и окружающей средой.

КПД коллектора зависит также от его рабочего состояния. Необходимо учитывать, что КПД коллектора изменяет свое значение в зависимости от температуры окружающей среды, а также от величины падающего излучения [8].

Энергоотдача гелиоустановки зависит от наклона и ориентации поверхности коллектора. При наклонной поверхности поглощения изменяется угол инсоляции, интенсивность облучения, и, как результат, количество поступающей энергии. Это количество энергии максимально, если излучение попадает на поверхность поглощения под прямым углом [9]. Такой случай в наших широтах не может быть достигнут, поэтому энергоотдачу можно оптимизировать путем наклона поверхности поглощения.

Другим критерием для расчет ожидаемого количества энергии является ориентация поверхности поглощения. В северном полушарии оптимальной является ориентация на юг. Зона оптимальной энергоотдачи гелиоустановки находится между юго-востоком и юго-западом, а также при углах наклона от 25 до 70 градусов. Более значительные отклонения,

например при монтаже на фасаде, могут быть компенсированы соответствующим увеличением площади коллектора. Требуется также предотвращать затенение поверхности поглощения.

Целью оптимизации работы солнечного коллектора является увеличение его КПД, а для этого необходимо повышать эффективность поглощения солнечного излучения и уменьшать потери тепла. Максимальный КПД достигается в том случае, если разность между температурой поглотителя и окружающей средой ΔT и термические потери равны нулю [11].

Как следует из уравнения (1) для оценки эффективности солнечных коллекторов требуется учет как минимум восьми параметров (факторов).

Поэтому в работе [1, 2] для решения этой задачи предложено применять методы многофакторной оптимизации. При этом для оптимизации термодинамических характеристик процесса нагрева воды с помощью солнечного коллектора предложена функциональная математическая модель солнечного коллектора. Эта модель представляет солнечный коллектор в виде динамической системы, осуществляющей преобразование входных возмущающих и управляющих воздействий в выходные переменные параметры (рис. 2)

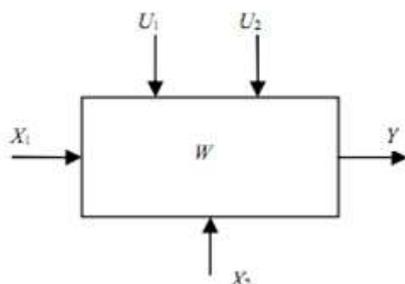


Рис. 2 – Солнечный коллектор

где U_1 – управляющий вектор прямого солнечного излучения;

U_2 – управляющий вектор рассеянного в атмосфере солнечного излучения;

X_1 – входной вектор условий нагрева теплоносителя;

X_2 – входной вектор потерь тепла;

Y – выходной вектор теплоносителя.

Однако на первом этапе исследований для получения экспресс-оценок с приемлемой степенью точности (погрешность не более 3-4%) целесообразно воспользоваться руководством по проектированию солнечных коллекторов компании Vaillant [3, 4], которое подготовлено с учетом статистической обработки большого количества экспериментальных данных.

Для этого, прежде всего, нужно оценить потребность m в горячей воде с учетом количества потребителей (жильцов дома или коттеджа) и индивидуального суточного потребления. Тогда

необходимое количество тепла Q можно рассчитать по формуле:

$$Q = m \cdot \Delta T \cdot 1.163 \text{ (Вт·час/день)},$$

где ΔT – разница температур между требуемой температурой воды и температурой холодной воды (+15°C); 1,163 – коэффициент для перевода единиц измерения (из Джоулей в Вт·час).

Как уже отмечалось, для дальнейших расчетов необходимо определить уровень инсоляции и среднемесячной температуры в зависимости от времени года.

Для Харьковского региона эти сведения представлены с помощью [5] в виде табл. 1, рис. 3 и табл. 2.

Таблица 1 – Уровень инсоляции в зависимости от времени года.

Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь
1,19	2,02	3,05	3,92	5,38	5,46
Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Ноя.	Дек.
5,56	4,88	3,49	2,10	1,19	0,9
Среднее значение = 3,26					



Рис. 3 – Ежемесячный усредненный случай облучения солнцем на горизонтальной поверхности для города Харьков (кВт/м2 за день)

Из рис. 3 видно, что минимальный уровень инсоляции наблюдается в декабре, а максимальный – в июле месяце, и превышает минимальный практически в 6 раз. Это создает определенные трудности при выборе коллекторных панелей для круглогодичной эксплуатации солнечной установки [6].

Производитель солнечных коллекторов Valliant приводит в руководстве по проектированию [3, 4] зависимость эффективности (КПД) плоских (auroTHERM VFK145H/V, auroTHERM plus VFK 150H/V) и вакуумных (auroTHERM exclusive VTK 570/2und 1140/2) солнечных коллекторов от разности температур между окружающей средой и коллектором (рис. 4). Из графика можно сделать вывод, что КПД вакуумных коллекторов меньше зависит от перепада температур «окружающая среда-коллектор», чем в случае плоских коллекторов.

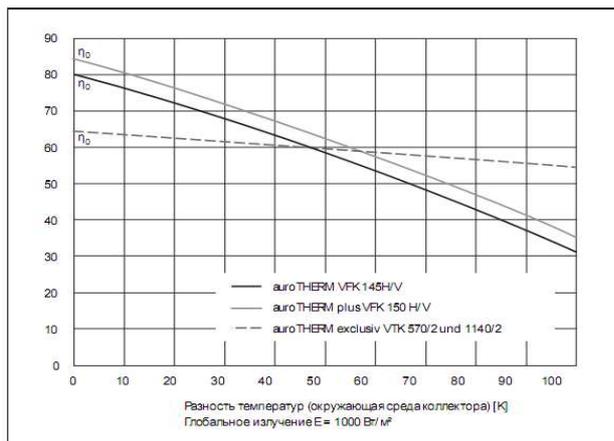


Рис.4 – Зависимость КПД от разности температур в коллекторе и окружающей среде

Для расчета средней эффективности коллекторов для нагрева воды (до 50°C) используя зависимость КПД от разности температур (рис. 2) и среднемесячную температуру для Харькова (табл. 2) можно определить среднее значение КПД в каждом месяце для г. Харькова (рис. 5).

Таблица 2 – Распределение температур по месяцам года для г. Харькова (по статистическим данным за период 1981-2010 год)

Показатель	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь
Абсолютный максимум, °C	11,0	14,6	21,8	30,5	34,5	36,8
Средняя температура, °C	-4,6	-4,5	0,7	9,2	15,6	19,3
Абсолютный минимум, °C	-35,6	-29,8	-32,2	-11,4	-1,9	2,2
Показатель	Июль	Авг.	Сен.	Окт.	Нояб.	Дек.
Абсолютный максимум, °C	37,6	39,8	33,7	29,3	20,3	13,4
Средняя температура, °C	21,3	20,3	14,4	7,9	0,9	-3,5
Абсолютный минимум, °C	5,7	2,2	-2,9	-9,1	-20,9	-30,8
Показатель	Год					
Абсолютный максимум, °C	39,8					
Средняя температура, °C	8,1					
Абсолютный минимум, °C	-35,6					

Несмотря на то, что плоские солнечные коллекторы обладают высокой эффективностью при средних температурах (рис. 2), необходимо также учитывать, что они обладают сравнительно низким КПД при очень низких температурах (при -35,6°C

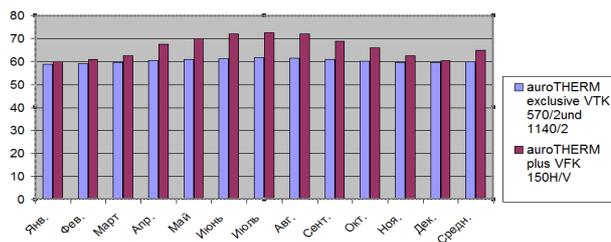


Рис. 5 – КПД коллекторов для каждого месяца в г. Харькове (плоские – auroTHERM plus VFK 150H/V и вакуумные – auroTHERM exclusiv VTK 570/2 und 1140/2)

КПД будет составлять примерно 44% согласно рис.1). Поэтому их применение нецелесообразно в зимнее время, когда преобладают отрицательные температуры.

Далее определим средний уровень поглощаемого излучения для каждого коллектора, для чего вычислим среднюю инсоляцию и средний КПД для каждого сезона:

Таблица 3 – Распределение по временам года средней инсоляции, температуры и средних КПД вакуумных и плоских коллекторов.

Время года	Зима	Лето	Осень
Средняя инсоляция, Вт/м ²	1370	5300	2260
Средняя температура, °C	-4,2	20,3	7,73
Среднее КПД вакуумных коллекторов, %	59	61,5	60,5
Среднее КПД плоских коллекторов, %	61	72	67

Определим необходимую площадь для каждого типа коллектора для каждого сезона по формуле:

$$S_{koll} = \frac{0,95 \cdot S_D \cdot Q_v}{S_N \cdot Q_v} = 0,95 \frac{S_D}{S_N \cdot \eta}, \quad (5)$$

S_D – степень покрытия энергозатрат за счет гелиоустановки;

S_N – степень использования гелиосистемы;

Q_v – потребление энергии (Квт·ч/год);

Q_E – инсоляция на м2 наклонной поверхности (Квт·ч/м2·год)

При установке коллектора на юг угол наклона соответствует широте установки. Для Харьковского региона при круглогодичной эксплуатации целесообразно выбирать угол наклона 45°.

С учетом рекомендаций [13] принимаем $S_D=1.0$ и $S_N=0.3$

С помощью формулы (5) и найденных средних КПД для каждого типа коллектора, условий эксплуатации

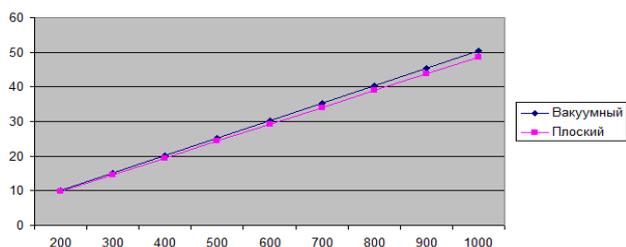
зимой, летом и осенью вычисляем их необходимую площадь.

Результаты расчетов представлены в табл. 4.

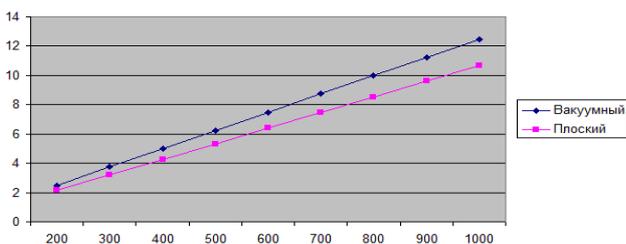
Таблица 4 – Необходимая площадь коллектора для каждого сезона

Потребн. л/день	Кол. тепла, Вт*час/день	Необходимая площадь, м ²					
		Зима		Лето		Осень	
		Вакуумные	Плоские	Вакуумные	Плоские	Вакуумные	Плоские
200	8141	10,07176	9,741534	2,497622	2,133386	5,95407	5,376436
300	12211,5	15,10763	14,6123	3,746434	3,200079	8,931105	8,064655
400	16282	20,14351	19,48307	4,995245	4,266771	11,90814	10,75287
500	20352,5	25,17939	24,35384	6,244056	5,333464	14,88518	13,44109
600	24423	30,21527	29,2246	7,492867	6,400157	17,86221	16,12931
700	28493,5	35,25114	34,09537	8,741678	7,46685	20,83925	18,81753
800	32564	40,28702	38,96614	9,990489	8,533543	23,81628	21,50575
900	36634,5	45,3229	43,8369	11,2393	9,600236	26,79332	24,19396
1000	40705	50,35878	48,70767	12,48811	10,66693	29,77035	26,88218

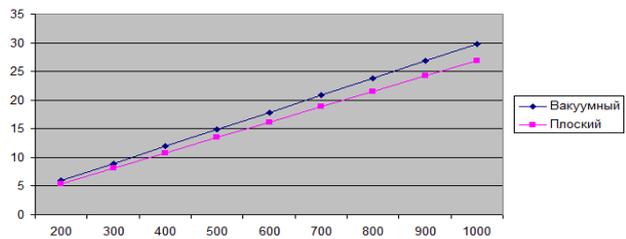
По данным таблицы 4 построены графики необходимой площади коллекторов (м²) в зависимости от расхода горячей воды (литр/день) для зимы (рис. 6, а), лета (рис. 6, б) и осени (рис. 6, в)



а)



б)



в)

Рис. 6 – Зависимость необходимой площади коллекторов (м²) от расхода воды (л/день)

На рис. 6 – а) в зимнее время; б) летнее время; в) в осеннее время (плоские – auroTHERM plus VFK 150H/V и вакуумные – auroTHERM exclusive VTK 570/2und 1140/2)

Подсчет количества энергии (табл. 4) показывает, что в зависимости от месяца использования для подогрева нужного количества воды, площадь коллекторов может существенно отличаться. При расчетах необходимого количества тепла для зимнего периода неизбежно возникает очень существенная проблема – утилизация тепла. Без ее решения вода в баке-аккумуляторе закипит, что может привести к выходу из строя оборудования [14].

Существует несколько способов решения подобной задачи:

- в зимнее время можно использовать дополнительно газовый котел для поддержания горячей воды;

- в летнее время лишнюю энергию целесообразно тратить на другие цели, например, отопление бассейна.

Таким образом, вопрос о реализации лишней энергии летом требует решения индивидуально каждым потребителем с учетом его личных интересов и возможностей.

Выводы

1. Расчет эффективности работы целесообразно выполнять используя многофакторную математическую модель методом многокритериальной оптимизации.
2. Наиболее эффективными режимами работы солнечных коллекторов являются режимы при минимальной разности температуры окружающей среды и поглотителя.
3. При выборе и проектировании коллекторных панелей для режимов круглогодичной эксплуатации

солнечной установки необходимо учитывать перепад уровней максимальной и минимальной солнечной инсоляции. Следует заметить, что КПД вакуумных коллекторов меньше зависит от перепада температур окружающей среды, чем при использовании плоских коллекторов.

Список литературы

1. **Кряклина, И. В.** Разработка математической модели солнечного коллектора для теплоснабжения дома фермера / **И. В. Кряклина** // *Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве*, Минск. – 2012. – 310 с.
2. **Garg, H. P.** Solar Energy: Fundamentals and Applications / **H. P. Garg** // *Tata McGraw-Hill Education*. – 2000 – 434 p.
3. Руководство по проектированию солнечных коллекторов компании vaillant. www.vaillant.ua
4. **Kalogirou, A.** Solar Energy Engineering: Processes and Systems / **A. Kalogirou** // *Soteris Academic Press*. – 2009 – 744 p.
5. Пособие по проектированию и расчету геосистем esco-ecosys.narod.ru/2011_10/art133.pdf
6. **Kreith, F., Kreider, J. F.** Principles of Solar Engineering. / **F. Kreith, J. F. Kreider** // *Second Edition D. Yogi Goswami*, CRC Press. – 2000 – 706 p.
7. **Амерханов Р. А.** Теплоэнергетические установки и системы сельского хозяйства. / **Р. А. Амерханов: под ред. Б. Х. Драганова.** // М.: Колос-пресс. – 2002. – 424 с.
8. **Захаров, А. А.** Применение теплоты в сельском хозяйстве / **А. А. Захаров** // М.: Агропромиздат. – 1986. – 288 с.
9. **Ачилов, Б. М.** Расчет температурного режима солнечного коллектора / **Б. М. Ачилов** // *Гелиотехника*. – 1980. – № 2. – С. 46 - 48.
10. **Mendes, J. F.** Solar Thermal Collectors in Polymeric Materials: A Novel Approach Towards Higher Operating Temperatures / **J. F. Mendes, P. Horta, M. J. Carvalho, P. Silva** // *Proceedings of ISES World Congress 2007* (Vol. I – Vol. V). – 2009. – P. 640-643.
11. **Папушин, Э. А.** Результаты исследований лучепоглощающих поверхностей солнечного коллектора / **Э. А. Папушин** // *Экология и сельскохозяйственная техника: Материалы второй научно-практической конференции*. Санкт-Петербург-Павловск. – 2000. – т. 3. – С. 156-158.
12. **Goetzberger, A.** Flat plate collector with bifacially irradiated absorber / **A. Goetzberger, M. Rommel, J. Dengler, V. Wittwer** // *Proceedings of the 4th International Workshop*. Birmingham: Franklin Company Consultants. – 1991. – P. 62-65.
13. **Klein, S. A.** Calculation of flat-plate collector utilizability. / **S. A. Klein** // *Solar energy*. – 1978. – vol. 21, no. 6. – P. 393-402.

14. **Валов, М. И.** Оптимальное значение площади солнечных коллекторов в системах теплоснабжения / **М. И. Валов** // *Гелиотехника*. М. – 1986. – № 1. – С. 33-39.

Bibliography (transliterated)

1. **Kryaklina, I. V.** Razrabotka matematicheskoy modeli solnechnogo kollektora dlya teplosnabzheniya doma fermera / **I. V. Kryaklina** // *Nauchno-tekhnicheskii progress v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve*. – 2012. – 310 s.
2. **Garg, H. P.** Solar Energy: Fundamentals and Applications / **Tata McGraw-Hill Education. – 2000. – 434 s.**
3. Rukovodstvo po proektirovaniyu solnechnykh kollektorov kompanii vaillant. www.vaillant.ua
4. **Kalogirou, A.** Solar Energy Engineering: Processes and Systems / **Soteris Academic Press**. – 2009. – 744 p.
5. Posobie po proektirovaniyu i raschetu geliosistem esco-ecosys.narod.ru/2011_10/art133.pdf
6. **Kreith, F., Kreider, J. F.** Principles of Solar Engineering / *Second Edition D. Yogi Goswami*, CRC Press. – 2000. – 706 p.
7. **Amerkhanov, R. A.** Teploenergeticheskie ustanovki i sistemy sel'skogo khozyaystva. / **R. A. Amerkhanov: pod red. B. Kh. Draganova** // М.: Kolos-press. – 2002. – 424 s.
8. **Zakharov, A. A.** Primenenie teploty v sel'skom khozyaystve. – М.: Agropromizdat. – 1986. – 288 s.
9. **Achilov, B. M.** Raschet temperaturnogo rezhima solnechnogo kollektora / *Geliotekhnika*. – 1980. – № 2 – S. 46 - 48.
10. **Mendes, J. F., Horta, P., Carvalho, M. J., Silva, P.** Solar Thermal Collectors in Polymeric Materials: A Novel Approach Towards Higher Operating Temperatures. *Proceedings of ISES World Congress 2007* (Vol. I – Vol. V). – 2009. – P. 640-643.
11. **Papushin, E. A.** Rezul'taty issledovaniy luchepogloshchayushchikh poverkhnostey solnechnogo kollektora / *Ekologiya i sel'skokhozyaystvennaya tekhnika: Materialy vtoroy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Sankt-Peterburg-Pavlovsk. – 2000. – t. 3. – S. 156-158.
12. **Goetzberger, A., Rommel, M., Dengler, J., Wittwer, V.** Flat plate collector with bifacially irradiated absorber / *Proceedings of the 4th International Workshop*. Birmingham: Franklin Company Consultants. – 1991. – P. 62-65.
13. **Klein, S. A.** Calculation of flat-plate collector utilizability / *Solar energy*. – 1978. – vol. 21, no. 6. – P. 393-402.
14. **Valov, M. I.** Optimal'noe znachenie ploshchadi solnechnykh kollektorov v sistemakh teplosnabzheniya / *Geliotekhnika*. Moscow. – 1986. – № 1. – S. 33-39.

Поступила (received) 15.05.2015