



МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕЛИОАБСОРБЦИОННОЙ ТЕПЛОНАСОСНОЙ СИСТЕМЫ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Нгуен Тиен¹, К.Х. Гильфанов¹, Д.Р. Гилязов²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²ООО «КЭР-Инжиниринг»

<https://orcid.org/0000-0002-8598-8024>,

kamil.gilfanov@yandex.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Предлагается бытовая система горячего водоснабжения, объединяющей солнечный коллектор и тепловой насос для климатических условий города БАКНИНЬ - ВЬЕТНАМ, способной круглогодично обеспечивать горячей водой 5 пользователей. *Обосновать работоспособность предлагаемой системы в данных условиях. МЕТОДЫ.* Решение задачи выполнено опытным путем и методом математического моделирования. Математическая модель основывается на уравнениях энергетического баланса с учетом коэффициентов полезного действия. Приведены схема и принцип работы опытной установки и результаты расчета системы комбинированного горячего водоснабжения на базе среднемесячных значений суммарной суточной радиации для места расположения солнечного коллектора. Система содержит в качестве источников энергии солнечный коллектор с вакуумными теплопоглощающими трубками и воздушный тепловой насос. При достаточной солнечной радиации горячая вода вырабатывается полностью из теплоабсорбционных вакуумных трубок, хранится в резервуаре солнечного коллектора и проходит через емкость теплового насоса до потребителя при неработающем тепловом насосе. В случае недостатка солнечного излучения включается воздушный тепловой насос. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Выполнен расчет мощности солнечного коллектора исходя из среднемесячных значений суммарной суточной радиации и эффективности солнечного коллектора, количество тепла добавляемого к солнечной системе горячего водоснабжения, тепловой мощности теплового насоса и выбран тепловой насос для системы горячего водоснабжения. *ВЫВОДЫ.* Результаты опытов подтверждают расчеты по восполнению дефицита тепла для солнечного коллектора воздушным тепловым насосом небольшой мощности в любое время года. Расчеты выполнены для системы обеспечивающей горячей водой суточную потребность пяти и трех человек. Показано, что небольшая теплопроизводительность теплового насоса позволяет снизить стоимость первоначальных капиталовложений в бытовые системы горячего водоснабжения с солнечным коллектором и соответственно перспективность предлагаемой системы горячего водоснабжения в условиях Вьетнама.

Ключевые слова: *система горячего водоснабжения; солнечный коллектор; тепловой насос; математическая модель.*

Для цитирования: Нгуен Тиен, Гильфанов К.Х., Гилязов Д.Р. Моделирование гелиоабсорбционной теплонасосной системы горячего водоснабжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 4. С. 55-65. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-4-55-65.

MODELING OF A HELIOABSORPTION HEAT PUMP SYSTEM FOR HOT WATER SUPPLY

Nguyen Tien¹, KH. Gilfanov¹, DR. Gilyazov²

¹FBSEI HE Kazan state Power engineering university, Kazan, Russia

²LLC «KER-Engineering»

<https://orcid.org/0000-0002-8598-8024>,

kamil.gilfanov@yandex.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* A domestic hot water supply system is proposed, combining a solar collector and a heat pump for the climatic conditions of the city BAC NINH - VIETNAM,

capable of providing hot water to 5 users all year round. Justify the performance of the proposed system under these conditions. **METHODS.** The solution of the problem was carried out experimentally and by the method of mathematical modeling. The mathematical model is based on the energy balance equations taking into account the efficiency factors. The scheme and principle of operation of the pilot plant and the results of the calculation of the combined hot water supply system based on the monthly average values of the total daily radiation for the location of the solar collector are presented. The system contains a solar collector with vacuum heat-absorbing tubes and an air heat pump as energy sources. With sufficient solar radiation, hot water is generated entirely from the heat-absorbing vacuum tubes, stored in the reservoir of the solar collector and passes through the reservoir of the heat pump to the consumer when the heat pump is not working. In case of insufficient solar radiation, the air heat pump is switched on. **RESULTS.** The calculation of the power of the solar collector based on the average monthly values of the total daily radiation and the efficiency of the solar collector, the amount of heat added to the solar hot water supply system, the heat capacity of the heat pump, and a heat pump for the hot water supply system was selected. **CONCLUSION.** The results of the experiments confirm the calculations for replenishing the heat deficit for the solar collector with an air heat pump of low power at any time of the year. The calculations are made for a system that provides hot water for the daily needs of five and three people. It is shown that the low heating capacity of the heat pump allows one to reduce the cost of initial investment in domestic hot water supply systems with a solar collector and, accordingly, the prospects of the proposed hot water supply system in Vietnam.

Keywords: hot water supply system; solar collector; heat pump; mathematical model.

For citation: Nguen Tien, Gilfanov KH., Gilyazov DR. Modeling of a helioabsorption heat pump system for hot water supply. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021; 23(4):55-65. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-4-55-65.

Введение

Вьетнам это страна на большей части территории, которой климат тропический, потребность в горячей воде в домашних хозяйствах, высотных домах, отелях, клиниках и огромна, особенно зимой на севере. Согласно данным, опубликованным на Азиатском семинаре по технологиям тепловых насосов и аккумулярованию тепла (2013 г.), энергия, используемая для производства горячей воды, всегда составляет значительную долю в общем потреблении энергии, показатели среди домашних хозяйств (частных домов) и отелей во Вьетнаме составляют 18% и 30%. Системы горячего водоснабжения (ГВС) с использованием солнечного коллектора привлекательны, поскольку страна имеет высокую интенсивность и длительность солнечного сияния. Эффективность гелиосистем значительно возрастает, если солнечные водонагревательные коллекторы сочетать с тепловыми насосами. При проектировании и эксплуатации необходимо решить вопросы поддержания непрерывного соответствия между количеством вырабатываемого тепла и энергии, потребляемой системой ГВС. Важной задачей при этом является достижение приемлемых первоначальных капитальных вложений, поскольку тепловые насосы недешевы.

Системы горячего водоснабжения на основе солнечного коллектора являются достаточно экономичными, однако имеют недостаток сезонного снижения энергоэффективности, что требует наличия резервного источника тепла [1-3]. В бытовом секторе сегодня два наиболее часто используемых типа резервного источника тепла - это электронагреватели и тепловые насосы, поскольку они работают от относительно доступной электроэнергии. Преимущество резервного источника тепла на основе резистивных нагревателей состоит в том, что он имеет простую конструкцию и прост в реализации, поэтому первоначальные инвестиционные затраты обычно очень малы по сравнению с общей стоимостью всей системы горячего водоснабжения. Недостатком этого источника тепла является то, что он имеет низкий коэффициент преобразования электрической энергии (мощности в тепло, по сравнению с тепловыми насосами), обычно менее 1, поэтому, при регулярном использовании представляют повышенные эксплуатационные расходы. Современные тепловые насосы имеют достаточно высокие коэффициенты преобразования энергии (около 3...4), однако системы ГВС с тепловыми насосами сравнительно дороги, высоки начальные инвестиционные затраты, вместе с тем более эффективны при регулярной нагрузке резервного источника тепла.

По данным действующих поставщиков [4-6], ориентировочная тепловая мощность теплового насоса, соответствующая 100 литрам емкости для горячей воды, колеблется от 2,4 кВт для небольших домашних систем и до 3,88 кВт для больших централизованных систем. Доля стоимости теплового насоса в цене солнечной системы ГВС достаточно значительна. При таком диапазоне производительности комбинирование солнечного коллектора с тепловым насосом для производства горячей воды представляет высокие начальные капитальные затраты, что значительно снижает эффективность инвестиций и снижает популярность этих систем горячего водоснабжения.

Поэтому создание системы горячего водоснабжения с использованием солнечной радиации в сочетании с тепловым насосом в качестве резервного источника энергии с низкой начальной стоимостью является актуальной проблемой. При этом мощность теплового насоса сводится к минимально достаточному уровню. Для этого необходимо решить три задачи: во-первых, создание рациональной принципиальной схемы и работы, во-вторых, построение эффективного алгоритма управления и в-третьих, расчет оптимальной производительности и режимов.

Принципиальная схема

На рисунке 1 представлена принципиальная схема бытовой системы горячего водоснабжения со встроенным солнечным коллектором и тепловым насосом. Система включает солнечный коллектор с вакуумными теплопоглощающими трубками, воздушный тепловой насос для преобразования тепла окружающей среды, бак-накопитель и циркуляционный насос горячей воды. Обратные клапаны установлены, как показано на рисунке 1, для обеспечения того, чтобы вода не уходила из системы ГВС обратно в линию водопровода при понижении давления. бак с горячей водой солнечного коллектора всегда был заполнен водой, что помогает защитить теплопоглощающие вакуумные трубки от растрескивания, вызванного чрезмерной тепловой нагрузкой или тепловым «шоком».

Кратковременный режим пользования горячей водой используется при достаточной солнечной радиации. Горячая вода вырабатывается полностью из теплоабсорбционных вакуумных трубок, хранится в резервуаре солнечного коллектора и проходит через конденсатор неработающего теплового насоса до потребителя. Бак теплового насоса действует как дополнительный бак, повышая емкость аккумуляции тепла всей системы. Поток воды в этом режиме создается за счет разности давлений (солнечный коллектор расположен выше уровня потребителя) при открытии крана горячей воды, благодаря чему система работает даже в случае отключения электроэнергии. В этом режиме работы горячую воду нельзя использовать в течение длительного времени, так как температура воды в резервуаре теплового насоса уменьшится относительно нормативного значения.

При дальнейшем снижении температуры управляющий контроллер включает циркуляционный насос, который прокачивает и замещает «холодную» воду на «горячую» воду из резервуара солнечного коллектора в бак-накопитель. Если коллектор достаточно мощный и солнечное излучение вполне способно компенсировать дефицит энергии, уходящей с горячей водой, то такой режим может быть довольно длительным.

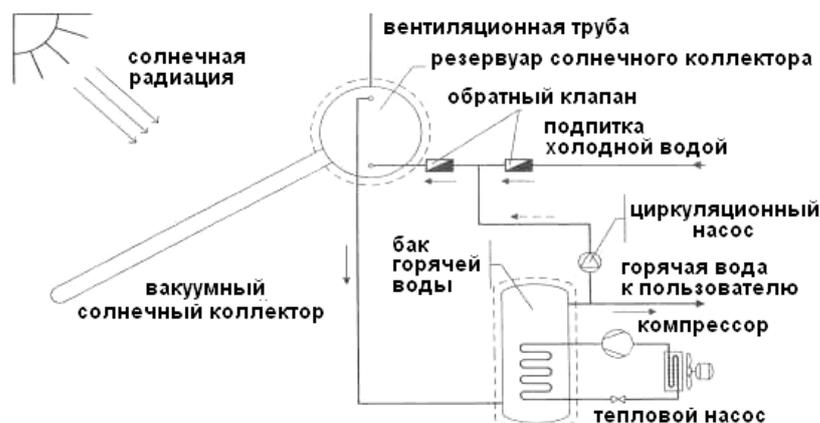


Рис. 1. Принцип работы бытовой системы ГВС, сочетающей солнечный коллектор и тепловой насос

Fig. 1. The principle of operation of a domestic hot water system combining a solar collector and a heat pump

В случае слабой солнечной радиации, по температуре на линии горячей воды, включается воздушный тепловой насос. В данной ситуации предусматривается два режима: 1) тепловой насос работает одновременно с циркуляционным насосом, таким образом тепло накапливается в баке-накопителе – это длительный режим; 2) циркуляционный насос отключен, тепловой насос работает на подогрев воды в его резервуаре, что позволяет быстро набрать нормативное значение температуры горячей воды. Первый режим привлекателен при потребности большего количества горячей воды в длительное время. Однако такой режим является достаточно инерционным, быстрый прогрев воды в такой ситуации проблематичен. Выгода второго режима в том, что немедленно удовлетворяется потребность в небольшом количестве горячей воды, а солнечный коллектор не обеспечивает быстрое потребление.

Методы

Метод расчета основан на уравнениях энергетического баланса и преследует цель определения минимальной тепловой мощности теплового насоса при заданных параметрах солнечного коллектора для конкретного географического местоположения солнечной тепловой установки.

Солнечный коллектор

Гелиоабсорбционная теплонасосная установка ГВС расположенная в Бакнине имеет географическое местоположение и параметры установки солнечного коллектора, приведенные в таблице 1 и параметры, представленные в таблице 2. Характеристики теплового насоса рассчитываются в качестве резервного источника солнечной системы горячего водоснабжения для данной опытной установки. По предварительным расчетам, при данных условиях установки, система способна удовлетворить горячей водой дом с пятью потребителями (человек). Тепловая мощность теплового насоса должна быть достаточно большой, чтобы компенсировать нехватку тепла в самый слабый период солнечной радиации для 5 человек, использующих горячую воду в любое время года.

Таблица 1

Географическое местоположение и параметры установки солнечного коллектора

	Параметр	Значение
1	Долгота	105,82 °E
2	Широта	21,03 °N
3	Азимутальный угол γ	0° (основное направление на юг)
4	Угол наклона β	22° (относительно горизонтальной плоскости)

Таблица 2

Технические характеристики опытной установки солнечной системы ГВС

	Параметр	Значение
1	Емкость бака горячей воды	200 литров
2	Теплоизоляция бака горячей воды	Полиуретан, плотность 30 кг/м ³ , толщина 40 мм
3	Тип абсорбента коллектора	Ni Tech Vacuum 3 слоя золотого покрытия трубки, внешний диаметр 58 мм, длина 1750 мм
4	Количество абсорбирующих трубок	20
5	Установочные размеры коллектора (w×l)	1570×1680 мм
6	Размер бака абсорбента (Д×Ш×В)	1740×1905×1275 мм

Расчет мощности солнечного коллектора.

Параметры компонентов установки ГВС определяются на основе математической

модели [7-14]. Чтобы определить дефицит тепла, сначала необходимо рассчитать мощность гелиоабсорбера. Расчет проводится на основе ежемесячного количества доступного солнечного излучения на месте, размера поглощающей поверхности и параметров установки.

Эффективная дневная мощность солнечного коллектора или выработанное количество тепла горячей водой за день, рассчитывается по следующей формуле:

$$Q_{it} = \eta_{cp} \cdot F_{ck} \cdot I_d, \text{ кДж/день}, \quad (1)$$

где F_{ck} - площадь солнечного коллектора, m^2 ; I_d - общее количество дневной радиации, рассчитанное на наклонной плоскости солнечного коллектора, $кДж/(m^2 \cdot \text{день})$; η_{cp} - средний дневной тепловой КПД солнечного коллектора.

Площадь F_{ck} определяется по геометрическим размерам солнечного коллектора:

$$F_{ck} = w \cdot l, \text{ м}^2. \quad (2)$$

Ширина w и длина l поглощающей поверхности соответственно приведены в таблице 2.

Величина суммарной дневной радиации, рассчитанная на поверхности солнечного коллектора I_d может быть определена из суточной радиации, рассчитанной на горизонтальной плоскости по следующей формуле [15]:

$$I_d = I_{bm} R_{bm} + I_{dm} R_{dm} + (I_{bm} + I_{dm}) R_{rm}, \text{ кДж}/(m^2 \cdot \text{день}), \quad (3)$$

где - I_{bm} и I_{dm} поглощаемая и рассеянная составляющие суточной радиации в горизонтальной плоскости, $кДж}/(m^2 \cdot \text{день})$;

R_{bm} , R_{dm} , R_{rm} коэффициенты преобразования для ортогональной, рассеивающей и отражающей составляющей соответственно.

Поскольку данные по Вьетнаму доступны только о среднемесячных значениях суммарной дневной радиации в горизонтальной плоскости [16], $I_{gm} = I_{bm} + I_{dm}$, $кДж}/(m^2 \cdot \text{день})$, принимается предположение, что рассеивающая составляющая составляет около 30% всего излучения. Тогда формулу (3) можно переписать следующим образом:

$$I_d = 0,7 I_{gm} R_{bm} + 0,3 I_{gm} R_{dm} + I_{gm} R_{rm} \quad (4)$$

Коэффициенты преобразования для рассеивающих и отражающих компонентов зависят только от угла наклона установки β и рассчитывается согласно [5]:

$$R_{dm} = (1 + \cos\beta)/2; \quad (5)$$

$$R_{rm} = \rho(1 - \cos\beta)/2, \quad (6)$$

где ρ - оптический коэффициент отражения, зависящий от радиационных свойств объектов и окружающей среды солнечного коллектора, установлен равным 0,2 для поверхностей типа травяного покрова или бетона [5].

Поскольку направление прямого излучения меняется в зависимости от времени суток, а также в течении года, необходимо рассчитать среднемесячное значение (интегральное среднее за период) для коэффициента преобразования. Используя в уравнениях (3) и (4), согласно [5], при наклонной плоскости главного южного направления $\gamma = 0^\circ$ эта величина определяется как:

$$R_{b,m} = [\omega_{st} \sin\delta \cdot \sin(\phi - \beta) + \cos\delta \cdot \sin\omega_{st} \cdot \cos(\phi - \beta)] / (\omega_s \sin\phi \cdot \sin\delta + \cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s); \quad (7)$$

компоненты

$$\omega_{st} = \cos^{-1}[-\text{tg}(\phi - \beta)\text{tg}\beta], \text{ рад};$$

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\text{tg}\phi \cdot \text{tg}\beta), \text{ рад}$$

представляют собой углы на восходе (или закате) наклонной плоскости солнечного коллектора и горизонтальной плоскости [5]. Угол солнечной широты в градусах, рассчитываемый для каждого дня года

$$\delta = 23,45 \sin[360(284+n)/365],$$

где - n - порядковое число типичных дней для каждого месяца, начиная с 1 января [17].

Применяя уравнения (4) - (7) с типичными днями месяца, определенными согласно [17], можно получить значения коэффициентов пересчета и общее количество дневной радиации. Установка наклонной плоскости солнечного коллектора на каждый месяц, как показано в таблице 3.

Таблица 3

Расчет среднемесячного значения суммарной суточной радиации для места установки солнечного коллектора (Бакнинь)

Месяц	Дата	n	δ , °угол	Ω_{st} , рад	Ω_s , рад	$R_{b,m}$	$R_{d,m}$	$R_{r,m}$	I_{gm} , кДж/(м ² день)	$I_{t,m}$, кДж/(м ² день)
1	17/1	17	-20,92	1,577	1,423	1,288	0,964	0,007	9879,0	11831,3
2	16/2	47	-12,95	1,575	1,482	1,156	0,964	0,007	9627,8	10643,9
3	16/3	75	-2,42	1,572	1,555	1,020	0,964	0,007	9292,9	9392,0
4	15/4	105	9,41	1,568	1,635	0,897	0,964	0,007	12934,7	11954,9
5	15/5	135	18,79	1,565	1,702	0,810	0,964	0,007	19632,3	16952,9
6	11/6	162	23,09	1,564	1,735	0,772	0,964	0,007	18627,7	15588,1
7	17/7	198	21,18	1,564	1,720	0,789	0,964	0,007	19506,8	16553,4
8	16/8	228	13,45	1,567	1,663	0,859	0,964	0,007	17037,0	15291,3
9	15/9	258	2,22	1,570	1,586	0,969	0,964	0,007	16953,3	16529,3
10	15/10	288	-9,60	1,574	1,506	1,109	0,964	0,007	15613,8	16749,4
11	14/11	318	-18,91	1,577	1,439	1,251	0,964	0,007	11762,7	13787,6
12	10/12	344	-23,05	1,578	1,406	1,329	0,964	0,007	11302,2	13865,9

Определение тепловой эффективности η солнечного коллектора является сложной нелинейной функцией многих факторов. В данной работе η определяется на основе эмпирической зависимости по разности температур между приемником и окружающей средой, рассчитанной на 1 единицу интенсивности солнечного излучения на наклонной плоскости приемника Δt_{m0} , КМ²/Вт, называемой разницей единицы температуры [18] в соответствии с графиком на рисунке 2. Для вакуумного трубчатого коллектора, при полной нагрузке, функциональная связь имеет следующий вид:

$$\eta_{t,m} = 0,634 - 0,906\Delta t_{m0} - 4,136\Delta t_{m0}^2. \quad (8)$$

Среднесуточная разность единиц температур:

$$\Delta t_{m0} = 3600\tau_{t,max} (t_{m} - t_{m,min}) / (1000I_{t,m}), \text{ КМ}^2/\text{Вт}, \quad (9)$$

где t_{m} и $t_{m,min}$ – номинальные и минимальные соответствующие температуры горячей воды, которые необходимо поддерживать, °С, $I_{t,m}$ – среднемесячная суммарная дневная радиация на каждый месяц места установки, кДж/(м²день); $\tau_{t,max}$, ч/день - количество солнечных часов в день, рассчитанное по наклонной плоской плотности солнечного коллектора и рассчитанное для характерного дня месяца согласно [5]:

$$\tau_{t,max} = 24\omega_{st} / \pi, \text{ ч/день}. \quad (10)$$

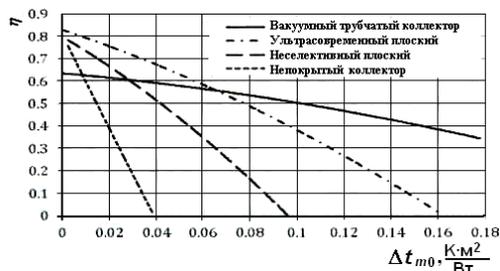


Рис. 2. График для определения теплового КПД солнечных коллекторов Fig. 2. A graph for determining the thermal efficiency of solar collectors

В таблице 4 приведены статистические данные по температурам горячей воды, для ряда пользователей [19]. Соответственно, в соответствии с нынешним уровнем жизни во Вьетнаме минимальная температура горячей воды в бытовом секторе составляет 45 °С.

Минимальная температура горячей воды для некоторых пользователей

	Объекты использования	Температура, °С
1	Умывальник - мытье рук	40
2	Умывальник - бритье	45
3	Душ и ванна	43
4	Лечебные ванны	35
5	Коммерческая или коллективная прачечная	До 82 (в зависимости от материала ткани)
6	Мойка посуды и стирка (автоматом)	60
7	Уборка в операционной	43
8	Посудомоечная машина	Минимум 65
9	Промышленная мойка распылением	82 -90

С учетом потерь тепла на трубопроводе от резервуара горячей воды к потребителю, а также во всей системе, температура горячей воды при полном заполнении принимается 48 °С. В сочетании со средними минимальными значениями температуры для каждого месяца, определенными согласно [20], используя представленные формулы, можно рассчитать среднесуточные значения термического КПД и общего эффективного тепла в течение дня, как показано в таблице 5.

Расчет количества тепла, необходимого для нагрева горячей воды, и количество тепла, добавляемого к солнечной системе горячего водоснабжения

Чтобы удовлетворить потребность в горячей воде пяти человек, необходимо рассчитать минимальную потребность в горячей воде в бытовых условиях и совместить эту потребность с периодичностью и динамикой солнечного приемника. Поскольку в настоящее время во Вьетнаме отсутствует отдельный стандарт для систем ГВС, минимальная потребность в горячей воде рассчитывается на основе потребности в неподогретой (холодной) воде.

Согласно [21], норма холодного водопотребления на пять человек в домашних условиях составляет $V_n = 5 \times 150 = 750$, литр/день. При наличии централизованной системы горячего водоснабжения стандарт использования холодной воды для вышеуказанных потребителей, также по данным [21], составляет $V_{nl} = 0,7 V_n = 0,7 \times 750 = 525$, литр/день. Таким образом, норма использования горячей воды в этом случае составляет $V_{nn} = V_n - V_{nl} = 750 - 525 = 225$, литр/день. Количество тепла, необходимое для нагрева горячей воды, можно рассчитать по формуле:

$$Q_{nn} = G_{nn}c_n(t_{nn} - t_{m,\min}) = V_{nn}\rho_n c_n(t_{nn} - t_{m,\min})/1000, \text{ кДж/день}, \quad (11)$$

где – G_{nn} – массовый расход, кг/день; V_{nn} – объемный расход, л/день; ρ_n – плотность воды, кг/м³; c_n – удельная теплоемкость воды, кДж/кгК.

Необходимое дополнительное (избыточное или недостаточное) количество тепла для солнечной системы горячего водоснабжения:

$$Q_{bs} = Q_{nn} - Q_u, \text{ кДж/день}. \quad (12)$$

Среднее ежемесячное значение общего количества тепла, необходимого для обогрева и пополнения каждый день, рассчитанное согласно уравнениям (11) и (12), также представлено в таблице 5. Видно, что система горячего водоснабжения за счет солнечной энергии производит избыток горячей воды по сравнению с потребностью только в период с мая по сентябрь. В остальные месяцы необходимо добавлять тепло от воздушного теплового насоса с максимальным значением 22712,7 кДж/день в феврале.

Таблица 5

Расчет среднемесячных характеристик системы гелиоабсорбционной теплонасосной системы ГВС

Месяц	$\omega_{ст}$, рад	$I_{g,m}$, кДж/м ² день	$\tau_{l,max}$, ч/день	$t_{m,min}$, °С	Δt_{m0} , КМ ² /Вт	$\eta_{l,m}$	Q_{m} , кДж/день	Q_u , кДж/день	Q_{bs} , кДж/день
1	1,577	11831,3	12,05	13,8	0,1254	0,455	32211,3	14169,3	18042,0
2	1,575	10643,9	12,03	11,7	0,1477	0,410	34189,2	11476,5	22712,7
3	1,572	9392,0	12,01	17,5	0,1404	0,425	28726,4	10507,0	18219,5
4	1,568	11954,9	11,98	20,8	0,0981	0,505	25618,3	15887,2	9731,2
5	1,565	16952,9	11,96	23,9	0,0612	0,563	22698,6	25105,6	-2407,0
6	1,564	15588,1	11,94	25,5	0,0621	0,562	21191,6	23033,3	-1841,7
7	1,564	16553,4	11,95	25,7	0,0580	0,568	21003,3	24710,9	-3707,6
8	1,567	15291,3	11,97	25,4	0,0637	0,560	21285,8	22502,0	-1216,2
9	1,570	16529,3	11,99	24,3	0,0619	0,562	22321,8	24433,5	-2111,6
10	1,574	16749,4	12,02	21,6	0,0682	0,553	24864,8	24358,1	506,7
11	1,577	13787,6	12,04	18,2	0,0937	0,513	28067,1	18593,7	9473,5
12	1,578	13865,9	12,06	15,0	0,1033	0,496	31081,1	18098,7	12982,3

Расчет тепловой мощности теплового насоса

Гелиоабсорбционная система ГВС имеет небольшую тепловую мощность по сравнению с теплоемкостью бака, для производства необходимого количества горячей воды требуется некоторое рабочее время, которое определяется в солнечных часах в день $\tau_{l,max}$, ч/день. Как представлено в таблице 5, количество солнечных часов в день для наклонной плоскости приемника незначительно варьируется в зависимости от месяца в году и колеблется около 12 часов в день. Причина этого заключается в том, что угол наклона установки плоских солнечных приемников β всегда рассчитывается так, чтобы получать больше излучения зимой и меньше излучения летом, чем в горизонтальной плоскости. Выбранный в статье угол установки β имеет приблизительное значение широты места установки для получения максимального количества излучения в году. Примечательно, что «количество солнечных часов», которое люди субъективно ощущают с концепцией длинных дней - коротких ночей летом и наоборот, коротких дней - длинных ночей зимой, справедливо только для горизонтальной плоскости.

Если учесть, что тепловому насосу необходимо восполнить недостаточное количество тепла в период, равный примерно 1/2 вышеуказанных солнечных часов, то есть $T = 6$ ч, можно определить минимальную тепловую мощность теплового насоса для наиболее дефицитного месяца:

$$Q_{np} = Q_{bs}/T = 22712,7/(6 \cdot 3600) = 1,05 \text{ кВт.} \quad (13)$$

Расчеты, выполненные для тех же условий по аналогичным нормам водопотребления для трех человек показывают, что период избыточности солнечной энергии ГВС расширяется - с апреля по декабрь, с максимальным дефицитом тепла в феврале 14037 кДж/день. Соответственно минимальная мощность теплового насоса составляет 0,65 кВт.

Расчет циркуляционного насоса горячей воды.

Предполагая, что при включении/выключении теплового насоса перепад температуры горячей воды составляет $\Delta t_{io} = 5$ К, массовый расход циркуляционного насоса водонагревателя исходя из производительности теплоты теплового насоса:

$$G_{cir} = Q_{np}/(c_p \Delta t_{io}) = 1,05/(4,186 \cdot 5) = 0,05 \text{ кг/с} = 180 \text{ л/ч.} \quad (14)$$

Выбор теплового насоса для системы ГВС

Исходя из схемы системы и принципа работы, результатов расчета теплопроизводительности теплового насоса может быть выбран тепловой насос - Midea, модель CE-RSJ-15GW/80RDN3, с емкостью бака для горячей воды 80 литров (поставляется в комплекте), тепловая мощность 1,3 кВт [5].

Обсуждение

В статье предложена комбинированная система горячего водоснабжения с солнечным коллектором и тепловым насосом, а также показан принцип работы и методика расчета основных компонентов. Отличительной чертой такой системы является

относительно детерминированный ритмичный характер поступления солнечного источника энергии и случайное неравномерное потребление горячей воды, при ее пиковом потреблении возможно захлаживание бака-аккумулятора. Согласование характеристик солнечного коллектора и воздушного теплового насоса является важнейшим условием экономичности системы ГВС. Оптимальные структура и характеристики гелиоабсорбционной теплонасосной системы должны строиться с учетом стоимости установки в целом, а также эксплуатационных расходов. Для обеспечения эффективной работы необходимо внедрение автоматического управления, работающей по алгоритму на основе математической модели.

Выводы

Расчеты ГВС выполнены в двух вариантах потребления для трех и пяти человек, при принятой мощности солнечного коллектора, тепловая мощность теплового насоса составляют 0,65 кВт и 1,3 кВт соответственно. Система полностью способна восполнить дефицит тепла в любое время года. Показано, что при небольшой теплопроизводительности теплового насоса можно преодолеть недостаток больших начальных капиталовложений в бытовые системы горячего водоснабжения с солнечным коллектором.

Литература

1. Бутузов В.А., Томаров Г.В., Шетов В.Х. Геотермальная система теплоснабжения с использованием солнечной энергии и тепловых насосов // Пром. энергетика. 2008. № 9. С.39-43.
2. Гершкович В.Ф. От централизованного теплоснабжения к тепловым насосам/ В.Ф. Гершкович // Новости теплоснабжения. (Эл. журнал) 2010. №11. С. 34-39.
3. Гладилин А.В., Альтернативная энергетика в современной экономике: состояние, развитие, перспективы / Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии. 2017. № 4-5 (41). С. 82-84.
4. Бутузов В.А., Брянцева Е.В., Бутузов В.В., Гнатюк И.С. Мировой рынок гелиоустановок и перспективы солнечного теплоснабжения в России // Энергосбережение. 2016. № 3. С. 70-80.
5. Hot water heat pump catalog. The international division, Midea air conditioning and refrigeration sector, 2012. https://midea-air.ru/files/shop_series/295/documents_file/2/0b0-3-m-thermal.pdf
6. Тепловые насосы для отопления и ГВС https://www.mitsubishi-aircon.ru/product/products/gsl8_atw_index.php.
7. Туник А.А. Математическая модель процессов теплопереноса в плоском солнечном коллекторе / Вестник МГСУ. 2016. № 1. С.126-142
8. Ефремова О.А., Хворова Л.А. Математическое моделирование систем солнечного теплоснабжения // Известия Алтайского государственного университета. 2017. № 4. С. 98-103.
9. António J.M. Araújo Solar thermal modeling for rapid estimation of auxiliary energy requirements in domestic hot water production: Proportional flow rate control, Energy. 2017. No. 138. P. 668-681.
10. Халлыев И., Гильфанов К.Х. Снижение стоимости теплонасосной системы теплоснабжения путем замены коллектора первого контура // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2020. Т. 22 № 1. С. 28-37.
11. Гильфанов К.Х., Гайнуллин Р.Н., Нгуен Тиен. Энергосберегающая система отопления объектов электроэнергетики // Вестник Казанского государственного энергетического университета. Казань: КГЭУ. 2020. № 1 (45). С. 46-53.
12. Ротов П. В., Сивухин А. А., Ротова М. А., др. В. Об эффективности управления циркуляцией горячей воды // Изв. вузов. Проблемы энергетики, 2020, Т. 22 № 6. С. 117-129 С. 117-129.
13. Васильев Л.Л., Харлампиди Д.Х., Тарасова В.А., и др. Гелиосистема отопления с двухфазной многокомпонентной жидкостью // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2019. № 1. С.56-63
14. Sukhatme K., Nayak J K. (2008), Solar energy: Principles of Thermal Collection and Storage, Third edition, Tata McGraw-Hill Education. <https://www.pdfdrive.com/solar-energy-principles-of-thermal-collection-and-storage-e183880096.html>
15. Nguyen Quoc Uy, Nguyen An Nguyen, Thanksgiving, literary (2016), verified Models the radiation absorbed on the surface of the glass tube, vacuum solar collector, energy sun, Magazine Features, range of temperature, 5/2016, no. 129, tr. 11-15, 32.

16. Ruchi Shukla, Sumathy K., Phillip Erickson, Jiawei Gong (2013), Recent advances in the solar water heating systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 19, pp. 173-190.
17. Liu B.Y.H., Jordan R.c. Daily insolation on surfaces titled toward the equator. *Transactions, ASHRAE*, 67, 526 (1961).
18. Cooper R.I. The absorption of solar radiation in solar stills. *Solar energy*, 12, 3 (1969).
19. Klein S.A. Calculation of monthly average insolation on titled surfaces. *Solar energy*, 19, 325 (1977).
20. US Army Installations Management Command (IMCOM), US Army Corps of Engineers (USACE) and the US Department of Energy Federal Energy Management Program (DOE FEMP). *Central solar hot water systems design guide*. 2011.
21. 1999 ASHRAE Handbook. HVAC Applications. 1999. https://www.academia.edu/11207373/Ashrae_1999_HVAC_Applications_Handbook.

Авторы публикации

Нгуен Тиен – аспирант Казанского государственного энергетического университета.

Гильфанов Камиль Хабибович – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», Казанский государственный энергетический университет.

Гилязов Дамир Рауфович – главный инженер проекта ООО «КЭР-Инжиниринг»

References

1. Butuzov VA, Tomarov GV, Shetov VKh. Geothermal heat supply system with the use of solar energy and heat pumps. *Prom. energetika*. 2008;9:39-43.
2. Gershkovich VF., Hershkowitz VF. From district heating to heat pumps. *News heat. (El. magazine)* in 2010;11:34-39.
3. Gladilin AV. Alternative energy in the modern economy: the state, development prospects. *Competitiveness in the global world: economics, science, and technology*. 2017;4-5 (41):82-84.
4. Butuzov VA, Bryantseva EV, Butuzov VV, Gnatyuk IS. The world market of solar installations and prospects of solar heat supply in Russia. *Energy saving*. 2016;3:70-80.
5. Hot water heat pump catalog. *The international division, Midea air conditioning and refrigeration sector*. 2012. https://midea-air.ru/files/shop_series/295/documents_file/2/0b0-3-m-thermal.pdf
6. *Heat pumps for heating and hot water supply*. https://www.mitsubishi-aircon.ru/product/products/gsl8_atw_index.php
7. Tunik AA. Mathematical model of heat and mass transfer processes in a flat solar collector. *Vestnik MGSU*. 2016;1:126-142.
8. Efremova OA, Khvorova LA. *Mathematical modeling of solar heat supply systems*. Proceedings of the Altai State University. 2017;4:98-103.
9. António JM. Araújo Solar thermal modeling for rapid estimation of auxiliary energy requirements in domestic hot water production: Proportional flow rate control. *Energy*. 2017;138:668-681.
10. Hallyev I, Gilfanov KH. Reducing the cost of a heat pump system of heat supply by replacing the collector of the first circuit. *Izv. vuzov. Problems of Energy*. 2020. V. 22;1:28-37.
11. Gilfanov KKh, Gainullin RN, Nguyen Tien. Energy-saving heating system for electric power facilities. *Bulletin of the Kazan State Power Engineering University*. Kazan., KSEU, 2020;1 (45):46-53.
12. Rotov PV, Sivukhin AA, Rotova MA, et al. On the efficiency of hot water circulation management. *Izv. vuzov. Problems of Power Engineering*. 2020;22(6):117-129.
13. Vasiliev LL, Kharlampidi DKh, Tarasova VA, et al. Solar heating system with two-phase multicomponent liquid. *Bulletin of the Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi*. 2019;1:56-63
14. Sukhatme K, Nayak JK (2008). *Solar energy: Principles of Thermal Collection and Storage, Third edition, Tata McGraw-Hill Education*. <https://www.pdfdrive.com/solar-energy-principles-of-thermal-collection-and-storage-e183880096.html>

15. Nguyen Quoc Uy, Nguyen An Nguyen, Thanksgiving, literary (2016), verified Models the radiation absorbed on the surface of the glass tube, vacuum solar collector, energy sun, *Magazine Features, range of temperature*. 2016;5(129):11-15, 32.

16. Ruchi Shukla, K. Sumati, Philip Erickson, Jiawei Gong (2013). *Recent advances in solar water heating systems: Reviews of renewable and sustainable energy sources*. 2013;19:173-190.

17. Liu B.Y.H, Jordan RC. Daily insolation on equator-facing surfaces. *Transactions, ASHRAE*. 1961;67:526.

18. Cooper RI. Absorption of solar radiation in solar distillation chambers. *Solar energy*. 1969;12:3.

19. Klein SA. Calculation of the average monthly insolation on inclined surfaces. *Solar energy*. 1977;19:325.

20. The U.S. Army Installation Management Command (IMCOM), the U.S. Army Corps of Engineers (USACE), and the U.S. Department of Energy's Federal Energy Management Program (DOE FEMP). *Guide to the design of central solar hot water systems*. 2011.

21. Handbook of ASHRAE 1999. Application of HVAC. 1999. https://www.academia.edu/11207373/Ashrae_1999_HVAC_Applications_Handbook

Authors of the publication

Nguyen Tien – Kazan State Power Engineering University.

Kamil H. Gilfanov – Kazan State Power Engineering University.

Damir R. Gilyazov – Chief Project Engineer of «KER-Engineering LLC».

Получено

26 июля 2021г.

Отредактировано

09 августа 2021г.

Принято

10 августа 2021г.