

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-103-116>

Разработка инженерной методики расчета сезонной гелиосистемы горячего водоснабжения

Е.В. Умеренков ¹ ✉, Э.В. Умеренкова ¹, Н.Е. Семичева ¹

¹ ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: tgk-stu6@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Целью исследования является разработка упрощенного подхода для дальнейшей алгоритмизации расчета гелиоприемника горячего водоснабжения (ГВС) сезонной работы индивидуального жилого дома и обозначение основных прогнозируемых величин.

Методы. Для достижения поставленных целей в работе были определены примерные значения основных характеристик гелиосистемы горячего водоснабжения (ГС ГВС), влияющих на технико-экономические показатели системы и определяющих режим эксплуатации системы, ее комфортность в использовании и обслуживании – коэффициент полезного действия солнечной установки, общие расходы на подогрев воды в нагревателе–дублиере, ход температуры воды в баке-аккумуляторе по расчетным суткам месяцев эксплуатации ГС ГВС. В качестве критерия эффективности системы принят коэффициент замещения гелиосистемы горячего водоснабжения, т.е. доля тепловой нагрузки ГВС, удовлетворяемой за счет поглощенной солнечной энергии в период работы установки.

Результаты. Предложен вариант постановки задачи для разработки алгоритма расчета гелиоприемника горячего водоснабжения индивидуального жилого дома для условий эксплуатации с относительно невысоким уровнем интенсивности солнечной радиации и наличия низких температур в зимнее время, что создает значительные трудности при круглогодичной эксплуатации системы и определяет сезонность ее работы. Разработанная методика позволяет произвести расчет хода температуры воды в баке-аккумуляторе, общее количество тепла, использованного для приготовления горячей воды за счет энергии солнечного излучения, коэффициент замещения и коэффициент полезного действия ГС ГВС.

Заключение. Получено универсальное уравнение, которое позволяет определить основные прогнозируемые параметры гелиосистемы для любого режима работы ГС ГВС.

Ключевые слова: накопитель тепла; солнечная энергия; гелиосистема; теплоснабжение; горячее водоснабжение.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования Умеренков Е.В., Умеренкова Э.В., Семичева Н.Е. Разработка инженерной методики расчета сезонной гелиосистемы горячего водоснабжения // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(5): 103-116. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-103-116>.

Статья поступила в редакцию 05.02.2019

Статья подписана в печать 10.09.2019

Статья опубликована 25.10.2019

© Умеренков Е.В., Умеренкова Э.В., Семичева Н.Е., 2019

Development of Engineering Methods for Calculating Seasonal Solar System of Hot-Water Supply

Evgeniy V. Umerenkov ¹ ✉, Elina V. Umerenkova ¹, Natalya E. Semicheva ¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: tgv-kstu6@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. The purpose of the research is to develop a simplified approach for the further algorithmization of a hot-water supply solar collector calculation for seasonal operation of an individual residential building and designation of the main predicted values.

Methods. To achieve objectives, the approximate values of the main solar system of hot-water supply characteristics was determined, affecting the technical and economic indicators of the system and determining the mode of system operation, its comfort in use and maintenance - the efficiency of the solar installation, the total cost of water heating in the alternate heater, the temperature of the water in the storage tank according to the estimated number of operation days in months of solar system of hot-water supply maintenance. As a criterion for the system effectiveness, the replacement coefficient for the solar system of hot-water supply was adopted, i.e. the share of the hot-water supply heat load satisfied by the absorbed solar energy during the operation of the facility.

Results. A variant of the problem statement is proposed for developing an algorithm for calculating a solar water collector for hot-water supply in an individual residential building for operating conditions with a relatively low level of solar radiation intensity and the presence of low temperatures in winter, which creates significant difficulties during the year-round operation of the system and determines the seasonality of its operation. The developed method allows to calculate: the course of the water temperature in the storage tank, the total amount of heat used to prepare hot water due to the energy of solar radiation; the replacement and efficiency coefficients for the solar system of hot-water supply.

Conclusion. A universal equation is obtained that allows you to determine the main predicted parameters of the solar system for any mode of operation for solar system of hot-water supply.

Keywords: heat accumulator; solar energy; heliosystem; heat supply; hot water supply.

Conflict of interest. The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Umerenkov E.V., Umerenkova E.V., Semicheva N.E. Development of Engineering Methods for Calculating Seasonal Solar System of Hot-Water Supply. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(5): 103-116 (In Russ.). [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2019-23-5-103-116](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-103-116).

Received 05.08.2019

Accepted 10.09.2019

Published 25.10.2019

Введение

Вопрос экономии энергоресурсов путем повышения энергоэффективности инженерных систем¹ приводит, в том числе, к рассмотрению возможности и целесообразности использования возобновляемых источников энергии.

Системы теплоснабжения, использующие традиционные виды тепловой энергии, и альтернативная теплоэнергетика с применением солнечной и других возобновляемых видов энергии предусматривает запасание избыточной тепловой энергии, поскольку периоды поступления теплоты с мощностями, превышающими требуемую, чередуются с промежутками времени, когда теплопроизводительность источника меньше расчетной тепловой нагрузки потребителя или отсутствует вообще [1-10].

Вопросы экономической целесообразности применения систем гелиотеплоснабжения рассмотрены в работах [11-13]. Очевидно, что анализ возможности и целесообразности использования энергосберегающего оборудования – а именно, системы гелиотеплоснабжения – в индивидуальном жилом доме нельзя выполнять в отрыве от конкретного географического положения объ-

екта. Наиболее перспективно использование солнечной энергии в районах с большим количеством солнечных дней в году. В [14] представлен анализ опыта разработки и эксплуатации гелиоустановок в Краснодарском крае.

Материалы и методы

В работе [15] (рис.1) рассмотрена возможность сезонного использования системы гелиотеплоснабжения для обеспечения горячей водой индивидуальный жилой дом, расположенный в сельской местности Курской области. География расположения объекта в данном случае определяет относительно невысокий (по сравнению с южными районами страны) уровень интенсивности солнечной радиации и наличие низких, отрицательных температур в зимнее время (до -30°C), что создает значительные трудности при круглогодичной эксплуатации системы.

Основой для разработки инженерных методик расчета накопителей тепла являются приближенные варианты постановки задачи теплообмена [3-10, 13, 16-18].

В настоящей работе сделана попытка разработать упрощенный подход для дальнейшей алгоритмизации расчета гелиоприемника горячего водоснабжения для индивидуального жилого дома и обозначить основные прогнозируемые величины.

Объектом является гелиосистема ГВС, включающая весь солнечный кон-

¹ "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации" (с изменениями и дополнениями, вступающими в силу с 01.01.2018): Федеральный закон от 23.11.2009 N 261-ФЗ (ред. от 29.07.2017). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

тур и некоторые элементы контура водоснабжения: бак-аккумулятор, система подпитки и водоразборный трубопровод.

В рассматриваемой гелиосистеме горячего водоснабжения [15] использовано два контура, что обусловлено следующими факторами:

- гелиосистема ГВС скомбинирована с системой отопления, и использование водонагревателя «зимней» системы ГВС удешевляет и упрощает систему в целом;

- в разработанной схеме по солнечному контуру циркулирует теплоноситель, который обеднен воздухом (по сравнению с водопроводной водой, которая бы поступала в коллектор при не-

замкнутом контуре), выделившимся в нерабочие часы через расширительный бак; это приводит к уменьшению коррозии как труб, так и коллекторов, и змеевика теплообменника, а также отсутствию постоянного (в течение рабочего периода) зарастания труб вследствие осаждения солей;

- при эксплуатации системы с замкнутым солнечным контуром есть возможность его заполнения антифризом, что позволит без дополнительных затрат расширить календарные сроки использования системы; возможны также пробные пуски и остановки системы без опорожнения бака-аккумулятора.

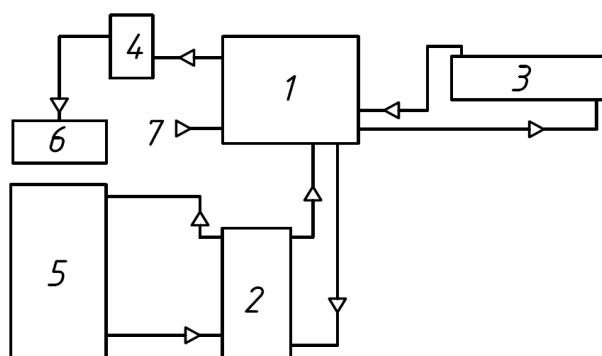


Рис. 1. Блок-схема системы теплоснабжения с гелиосистемой горячего теплоснабжения: 1 – емкостной водоводяной теплообменник; 2 – водогрейный котел; 3 – солнечный коллектор; 4 – электроводонагреватель; 5 – система отопления; 6 – система горячего водоснабжения; 7 – подача воды из водопровода

Fig. 1. Block diagram of a heat supply system with a solar system of hot water supply: 1 – capacitive water-water heat exchanger; 2 – hot water boiler; 3 – solar collector; 4 – electric water heater; 5 – heating system; 6 – hot-water supply system; 7 – water supply from the water supply system

Целью задачи инженерного расчета гелиоприемника горячего водоснабжения для индивидуального жилого дома является определение примерных значений основных характеристик, влияющих на технико-экономические пока-

затели системы и определяющих режим эксплуатации системы, ее комфортность в использовании и обслуживании.

В качестве критерия эффективности системы принят коэффициент замещения f гелиосистемы горячего водо-

снабжения, представляющий собой величину, равную доле тепловой нагрузки ГВС, удовлетворяемой за счет поглощенной солнечной энергии в период работы установки (6 месяцев).

Кроме того, поставлена цель определения следующих величин:

- коэффициент полезного действия солнечной установки, т.е. доля солнечной энергии, падающей на поверхность гелиоприемников, которая была поглощена и полезно использована;

- общие расходы на догрев воды в нагревателе-дублере, на привод насоса и системы автоматизации системы;

- ход температуры воды в баке-аккумуляторе по расчетным (средним) суткам месяцев эксплуатации ГС ГВС, характеризующей комфортность системы, т.к., определяя и время дополнительной обработки воды перед водоразбором-время догрева.

Постановка задачи предполагает описание следующих основных процессов:

- поглощение солнечной энергии гелиоприемниками;

- нагрев теплоносителя в гелиоприемниках;

- охлаждение теплоносителя в змеевике бака-аккумулятора;

- передача тепла от теплоносителя солнечного контура к воде через поверхность нагрева змеевика бака-аккумулятора;

- нагрев (охлаждение) воды в баке-аккумуляторе под воздействием следующих факторов: теплоотдача змеевика; теплопотери через стояки; отбор горячей воды; подача холодной воды.

Процесс нагрева воды в электродонагревателе не рассматривается, но подразумевается.

Работа ГС ГВС характеризуется нестационарными процессами тепломассопередачи, что создает определенные трудности для описания их математическими уравнениями. Поэтому при разработке математической модели было введено несколько допущений, обоснованных в [7], которые не оказывают значительного влияния на конечный результат. Некоторые допущения будут проанализированы при составлении модели.

Мощность, поглощенная в гелиоприемниках, может быть найдена по формуле [11] (Вт):

$$Q_K = F_R \cdot A \cdot [E(\tau) \cdot (\tau \cdot \alpha) - \dot{U}_L \cdot \times (t'_K - t_H)], \quad (1)$$

где F_R – коэффициент отвода тепла из коллектора;

A – площадь поверхности поглощающих пластин солнечных коллекторов, m^2 ;

$E(\tau)$ – поток солнечной радиации в плоскости солнечных коллекторов, $Вт/m^2$;

τ – пропускательная способность прозрачного покрытия гелиоприемника по отношению к солнечному излучению, зависящая от угла падения солнечных лучей;

α – поглощательная способность пластины коллектора по отношению к солнечному излучению, зависящая от угла падения солнечных лучей;

\dot{U}_L – полный коэффициент тепловых потерь гелиоприемника, $Вт/(m^2 \cdot ^\circ C)$;

t'_K – температура теплоносителя солнечного контура на входе гелиоприемника, °C;

$t_H(\tau)$ – температура наружного воздуха, °C.

Мощность, поглощаемая теплоносителем и отводимая из гелиоприемника (Вт):

$$Q''_K = A \cdot G_K \cdot C_{pk} \cdot (t''_K - t'_K), \quad (2)$$

где G_K – расход теплоносителя в солнечном контуре в расчете на 1 м² поверхности гелиоприемника, кг/(с·м²);

C_{pk} – удельная теплоемкость теплоносителя солнечного контура, Дж/(кг·°C);

t''_K – температура теплоносителя солнечного контура на выходе гелиоприемника, °C.

Мощность, отдаваемая теплоносителем солнечного контура в змеевике бака-аккумулятора (Вт):

$$Q'_A = G_K \cdot A \cdot C_{pk} \cdot (t'_A - t''_K), \quad (3)$$

где $t'_A - t''_K$ – температура теплоносителя солнечного контура соответственно на входе и на выходе змеевика бака-аккумулятора, °C.

Мощность, передаваемая через поверхность нагрева змеевика бака-аккумулятора (Вт):

$$Q''_A = R_A \cdot F_A \cdot \Delta \bar{t}, \quad (4)$$

где R_A – коэффициент теплопередачи змеевика, Вт/(м²·°C);

F_A – площадь поверхности нагрева змеевика, из расчета которой определена величина R_A , м²;

$\Delta \bar{t}$ – средний температурный напор, создаваемый на змеевике между теплоносителем солнечного контура и водой в баке-аккумуляторе, °C.

Уравнение теплового баланса для бака-аккумулятора:

$$Q''_A + Q_x = Q_B + Q_{гв} + Q_{пот}, \quad (5)$$

где Q_x – количество тепла (Вт), поступающего в бак-аккумулятор при его подпитке холодной водой, определяемое по формуле

$$Q_x = G_A \cdot C_{pk} \cdot t_x, \text{ Вт} \quad (6)$$

Q_B – количество тепла, расходуемое на изменение теплоснабжения воды в баке-аккумуляторе, Вт, определяемое по формуле (положительно при повышении температуры, отрицательно – при понижении):

$$Q_B = M \cdot C_{pk} \cdot \frac{d\bar{t}_a}{d\tau}, \quad (7)$$

$Q_{гв}$ – количество тепла (Вт), отводимого из бака-аккумулятора при водоразборе, определяемое по формуле

$$Q_{гв} = G_A \cdot C_{pk} \cdot t_{a*}, \quad (8)$$

$Q_{пот}$ – теплопотери бака-аккумулятора (Вт), определяемые по формуле

$$Q_{пот} = R_6 \cdot F_6 \cdot (\bar{t}_a - t_{H*}), \text{ Вт} \quad (9)$$

где G_A – расход воды через бак-аккумулятор, определяемый режимом водопотребления, кг/с (табл.);

t_x – температура воды, поступающей из холодного водопровода, °C;

τ – время, с;

\bar{t}_a – среднеинтегральная температура воды в баке-аккумуляторе;

M – масса хранимого в баке-аккумуляторе запаса воды, кг;

t_{a*} – температура воды в баке-аккумуляторе в зоне ее забора водоразборным трубопроводом, °C;

R_6 – коэффициент теплопередачи через стенки бака-аккумулятора, м²;

t_{H*} – температура воздуха в помещении, где установлен бак-аккумулятор, °C.

Таблица. Средний режим потребления горячей воды в течение суток

(\bar{G} доля суточного расхода воды, потребляемая в течение часа)Table. Average mode of hot water consumption during the day (\bar{G} share of daily water consumption consumed during one hour)

$\tau_p, \text{час}$	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18
$\bar{G} \%$	1,3	4,8	7,2	8,4	7,0	4,6	3,6	5,2	2,6	2,2	2,0	3,8
$\tau_p, \text{час}$	18-9	19-20	20-21	21-22	22-23	23-0	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
$\bar{G} \%$	6,9	11,9	9,7	6,9	5,2	4,7	2,0	0	0	0	0	0

Температура поглощающей пластины гелиоприемника при отсутствии циркулирующего теплоносителя (нет отвода тепла), может быть определена по формуле [18]

$$t_{\infty} = t_H + \frac{E(\tau) \cdot (\tau \alpha)}{U_L}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10)$$

где все величины соответствуют обозначениям в формуле (1).

Надо отметить, что уравнение (1) записано для одного гелиоприемника. Для определения общей величины теплоступлений необходимо просуммировать результаты, полученные при расчете каждого коллектора отдельно. Но, пренебрегая незначительной величиной неравномерности распределения теплоносителя по коллекторам и потерями тепла в соединительные трубопроводы, можно считать блок гелиоприемников за единую панель, площадь которой равна сумме площадей, составляющих блок гелиоприемников. В этом случае уравнение теплового баланса для гелиоприемников запишется в следующей формуле:

$$Q'_K = Q''_K. \quad (11)$$

Уравнение теплового баланса для змеевика бака-аккумулятора:

$$Q'_A = Q''_A. \quad (12)$$

Пренебрегая также теплотерями трубопроводов солнечного контура, можно записать:

$$Q'_K = Q''_K. \quad (13)$$

При работе системы в режиме аккумуляирования солнечной энергии (с водоразбором и без него), в баке-аккумуляторе будет наблюдаться постоянная естественная циркуляция воды вследствие нагрева нижних слоев змеевика. При этом по всему объему установится примерно постоянная температура, т.к. стратификация проектом не предусматривается. Возникновение градиента температур возможно только в том случае, когда нет подвода тепла от гелиоприемников ($t_{\infty} \leq t_A$). Однако пренебрегая этой стратификацией воды, мы получим результат несколько заниженный (по эффективности системы), но с небольшой погрешностью. Учитывая это допущение, можно принять температуру воды в баке постоянной по всему объему в любой момент времени:

$$t_{a*} = t_a \cdot \bar{t}_a. \quad (14)$$

Средний температурный напор на змеевике (см. формулу (4)) с достаточной точностью можно принять равный среднеарифметическому в любой момент времени, т.е.

$$\Delta \bar{t} = \frac{t'_A + t''_A}{2} - t_A, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (15)$$

Таким образом, уравнениями (11), (13) -(15) записаны все оговоренные пунктом гипотезы, принимаемые для упрощения математической модели и расчетов по ней.

Моделирование нестационарных тепловых процессов всегда связано с затруднениями в составлении и решении балансовых уравнений. Поэтому в [7] рекомендуется моделировать нестационарные процессы стационарными в течение некоторого промежутка времени. При моделировании гелиосистем, основными исходными данными к расчету теплообмена является условно кусочно постоянные функции величины интенсивности солнечной радиации и температуры наружного воздуха. В начальный момент временного интервала Δt определяются внешние условия и рассматривается тепловой баланс системы.

Применение этого принципа и моделирования дает хорошие результаты

[19]. Поэтому она была применена и в этой работе.

Перепишем уравнение (13) с учетом (2) и (3)

$$A \cdot G_A \cdot C_{pk} \cdot (t''_K - t'_K) = A \cdot G_A \cdot C_{pk} \cdot (t'_A - t''_A), \quad (16)$$

$$t''_K - t'_K = t'_A - t''_A. \quad (17)$$

Результаты и их обсуждение

Учтя, что все четыре температуры в уравнении (17) характеризуют один и тот же теплоноситель в различных точках системы, и в допущении стационарности процесса получаем единственное решение:

$$\{t''_K - t'_K; t'_A - t''_A\}. \quad (18)$$

То есть температура теплоносителя солнечного контура изменяется только в гелиоприемниках и змеевике бака-аккумулятора, оставаясь величиной постоянной на всем протяжении трубопроводов контура.

Для составления уравнения, решением которого можно было бы найти основные прогнозируемые величины t_A и $Q_{\text{доп}}^{\text{общ}}$ (ход температуры воды в баке-аккумуляторе и общее количество дополнительной энергии), необходимо решить совместно уравнения (5), (11) и (12) с учетом (14), (15) и (18):

$$R_A \cdot F_A \cdot \left(\frac{t''_K + t'_K}{2} - t_A \right) + G_A \cdot C_{pk} \cdot t_x = M \cdot C_{pk} \cdot \frac{dt_A}{d\tau} + G_A \cdot C_{pk} \cdot t_A + R_6 \cdot F_6 \cdot (t_A - t_{H*}) \text{ Вт}; \quad (19)$$

$$A \cdot F_R \cdot (\tau \alpha) \cdot E - A \cdot F_R \cdot \bar{U}_L \cdot (t'_K - t_H) = A \cdot G_A \cdot C_{pk} \cdot (t''_K - t'_K) \text{ Вт}; \quad (20)$$

$$A \cdot G_A \cdot C_{pk} \cdot (t''_K - t'_K) = R_A \cdot F_A \cdot \left(\frac{t'_K + t''_K}{2} - t_A \right), \text{ Вт}. \quad (21)$$

Уравнение (20) удобнее использовать после проведения некоторых преобразований:

$$F_R(\tau\alpha)_n \cdot \frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} \cdot E - F_R \cdot \vartheta_L \cdot (t'_K - t_H) = G_A \cdot C_{pk} \cdot (t''_K - t'_K). \quad (22)$$

Здесь $(\tau\alpha)_n$ – оптический КПД гелиоприемника по отношению к солнечному излучению, падающему по нормали к поверхности.

Величины $F_R(\tau\alpha)_n$ и $F_R \vartheta_L$ характеризуют конструктивное исполнение ге-

лиоприемников и определяются их размерами и устройствами. Далее использованы следующие обозначения:

$$\begin{cases} X = F_R(\tau\alpha)_n; Y = F_R \vartheta_L; \\ \beta = \frac{\tau\alpha}{(\tau\alpha)_n}; \\ m_a = M \cdot C_{pa}; \\ f_a = F_R \cdot F_A; f_6 = R_6 \cdot F_6; \\ g_a = G_A \cdot C_{pa}; g_K = G_K C_{pk}. \end{cases} \quad (23)$$

С учетом введенных обозначений и опуская промежуточные преобразования получим:

$$\left\{ f_a \cdot \left(\frac{t'_K + t''_K}{2} \right) + g_a \cdot t_x = m_a \cdot \frac{\alpha t_a}{\alpha \tau} + g_a t_a + f_6(t_A - t_{H*}) \right. \quad (24)$$

$$\left\{ A \cdot g_K \cdot (t''_K + t'_K) = f_a \cdot \left(\frac{t'_K + t''_K}{2} - t_A \right) \right. \quad (25)$$

$$\left\{ x \cdot \beta \cdot E - Y \cdot (t'_K - t_H) = g_K \cdot (t''_K - t'_K). \right. \quad (26)$$

В уравнениях (24) - (26) неизвестными величинами являются t_A ; t'_K и t''_K , т.е. имеется три уравнения с тремя не-

известными. Решая систему, в первую очередь необходимо получить аналитическое выражение для нахождения t_A .

$$t'_K = \frac{f_a \cdot t_A + X \cdot \beta \left(A - \frac{f_a}{2 \cdot g_K} \right) \cdot E + Y \left(A - \frac{f_a}{2 \cdot g_K} \right) \cdot t_H}{A \cdot Y + f_a - \frac{f_a \cdot Y}{2 \cdot g_K}}. \quad (27)$$

После ряда преобразований, получаем уравнение, разрешимое отно-

сительно по t_A и не включающее t'_K и t''_K :

$$\frac{\alpha t_A}{\alpha \tau} + \frac{1}{m_a} \cdot (g_a + f_6 + \frac{A \cdot Y + f_a}{A \cdot Y + f_a - \frac{f_a \cdot Y}{2 \cdot g_K}}) = \frac{1}{m_a} \frac{A \cdot X \cdot \beta \cdot f_a}{A \cdot Y + f_a - \frac{f_a \cdot Y}{2 \cdot g_K}} E + \frac{1}{m_a} \frac{A \cdot Y \cdot f_a}{A \cdot Y + f_a - \frac{f_a \cdot Y}{2 \cdot g_K}} \cdot t_H + \frac{f_6}{m_a} t_{H*} + \frac{g_a}{m_a} t_x. \quad (28)$$

В уравнение (28) входит величина t_{H*} - температура воздуха в помещении, где устанавливается бак-аккумулятор. Определить зависимость t_{H*} от t_H , E и других факторов с достаточной точно-

стью сложно. Можно утверждать, что t_{H*} будет в среднем не ниже t_H , а поскольку в помещение поступает тепло $Q_{пот}$ от бака-аккумулятора, то $t_{H*} > t_H$.

В расчётах принято, что разница температур постоянная и равна 5°C , более точная оценка возможна после определения $((t_A))$. Учтя вышесказанное, введем новые обозначения.

$$\begin{cases} a_0 = \frac{1}{m_a} \cdot \left(g_a + f_6 + \frac{A \cdot y + f_a}{A \cdot y + f_a - \frac{f_a \cdot y}{2 \cdot gk}} \right); \\ a_1 = \frac{1}{m_a} \cdot \left(\frac{A \cdot X \cdot \beta + f_a}{A \cdot y + f_a - \frac{f_a \cdot y}{2 \cdot gk}} \right); \\ a_2 = \frac{1}{m_a} \cdot f_6 + \left(\frac{A \cdot y + f_a}{A \cdot y + f_a - \frac{f_a \cdot y}{2 \cdot gk}} \right); \\ a_3 = \frac{1}{m_a} \cdot (5 \cdot f_6 + g_a \cdot t_x). \end{cases}$$

С учетом введенных обозначений:

$$\frac{\alpha t_a}{\alpha \tau} + a_0 t_A = a_1 E + a_2 t_H + a_3. \quad (29)$$

Согласно сказанному выше, величины E и t_H принимаются условно постоянными в течение интервала времени $\Delta \tau = \tau - \tau_0$. Поэтому можно обозначить правую часть уравнения (29) через некоторую постоянную:

$$c_0 = a_1 \cdot E + a_2 \cdot t_H + a_3. \quad (30)$$

Уравнение (29) принимает более простой вид:

$$\frac{\alpha t_a}{\alpha \tau} + a_0 \cdot t_A = c_0. \quad (31)$$

Решим это уравнение методом разделения переменных, как наиболее простым.

Начальное условие выбрано следующим: в начальный момент рассчитываемого промежутка времени $\Delta \tau = \tau_1 - \tau_0$, т.е. при $\tau = \tau_0 = 0$.

Температура воды в баке равна начальной

$$t_A / \tau_0 = t_{A0}.$$

Задавшись начальными условиями, получаем интересующее нас частное решение уравнения (31):

$$t_A = (t_{A0} \cdot \frac{c_0}{a_0}) e^{-a_0 \tau} + \frac{c_0}{a_0}, ^{\circ}\text{C}. \quad (32)$$

Выводы

Предложен вариант постановки задачи для дальнейшей алгоритмизации инженерного расчета гелиоприемника горячего водоснабжения индивидуального жилого дома. Получено универсальное уравнение которое позволяет произвести расчет хода температуры воды в баке-аккумуляторе для любого режима работы ГС ГВС. Это, в свою очередь позволяет рассчитать основные прогнозируемые параметры гелиосистемы, влияющие на технико-экономические показатели системы и определяющих режим ее эксплуатации.

Список литературы

1. Левенберг В. А., Ткач М. П., Гольстрем В. А. Аккумулирование тепла. Киев: Техника, 1991. 112 с.
2. Врине Е. Исследование установки, работающей в периодическом режиме, для аккумулирования тепла скрытой теплотой // *Revue Generale de Thermique*. 1983. Т. 22, № 254. С. 183-188.

3. Кобелев Н. С., Котенко Э. В., Полозов А. Е. Энергосберегающие технологии, трубопроводы и оборудование систем теплогазоснабжения и вентиляции. Курск, 2005. 200 с.

4. Манасыпов Р. Р., Лихтенштейн Э. Л. Математическое и физическое моделирование процессов теплообмена в аккумуляторе фазового перехода // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1988. № 8. С. 88-92.

5. Лукашов Ю. М., Токарь Б. З., Котенко Э. В. Исследование характеристик теплового аккумулятора на фазовом переходе // Труды 1-й рос. нац. конф. по теплообмену. М.: Изд-во МЭИ, 1994. Т. 5. С. 109-113.

6. Токарь Б. З., Быковцев Ю. С., Котенко Э. В. Приближенный расчет температуры теплоносителя на выходе из фазопереходного аккумулятора теплоты (режим разрядки) // Труды 2-й рос. нац. конф. по теплообмену. М.: Изд-во МЭИ, 1998. Т. 7. С. 217-220.

7. Токарь Б.З., Котенко Э.В., Цепочкин В.Г. Расчет режима разрядки фазопереходного аккумулятора теплоты кожухотрубного типа // Труды 3-й рос. нац. конф. по теплообмену. М.: Изд-во МЭИ, 2002. Т. 7. С. 230-234.

8. Котенко Э. В. Разработка математической модели и методики расчета аккумуляторов теплоты на фазовом переходе: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.05. Курск, 1996. 15 с.

9. Умеренков Е.В. Разработка аккумуляторов теплоты на фазовом переходе для систем теплоснабжения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Курск, 2013. 18 с.

10. Цымбалюк Ю. В. Исследование процессов с фазовыми переходами материалов с пластинчатыми инклюзивами в тепловых аккумуляторах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14. Астрахань, 2006. 15 с.

11. Бекман У., Клейн С., Даффи Дж. Расчет систем солнечного теплоснабжения: [пер. с англ.]. М.: Энергия, 1980. 80 с.

12. Дж. А. Даффи, Бекман У. А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии: [пер. с англ.]. М.: Мир, 1977. 420 с.

13. Быстров В. П., Ливчак А. В. Теплоаккумуляторы с использованием фазового перехода // Вопросы экономии теплоэнергетических ресурсов в системах вентиляции и теплоснабжения: сб. науч. трудов. М.: Изд-во ЦНИИЭПИО, 1984. С. 75-90.

14. Бутузов В. А. Анализ опыта разработки и эксплуатации гелиоустановок в Краснодарском крае // Энергетическая эффективность. 2002. № 34. С. 54-61.

15. Организация режима работы гелиотеплоснабжения индивидуального жилого дома / Э.В. Умеренкова, Е.В. Умеренков, М.Д. Зайко, А.А. Шпилько // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых-2018: сборник научных статей 8-ой Международной молодежной научной конференции (Курск, 25-26 апреля 2018 г.): в 4 т. Курск, 2018. Т. 3. 413 с.

16. Умеренков Е.В., Котенко Э.В. Моделирование процесса разрядки фазопереходного аккумулятора теплоты кожухотрубного типа // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. 2011. №1(21). С. 34-39.

17. Численное моделирование оптимального теплового аккумулятора на фазовом переходе / О.В. Дихтиевский, Г.В. Конюхов, О.Г. Мартыненко, И.Ф. Юревич // ИФЖ. 1991. Т.61, №5. С. 749-753.

18. Математическая модель системы горячего водоснабжения с использованием солнечной энергии, работающей по трёхконтурной схеме: промежуточный отчет / ЭНИН им. Г. М. Кржижановского; рук. темы И. В. Рыбин. М., 1979. 92 с.

19. Математическая модель системы горячего водоснабжения с использованием солнечной энергии, работающей по двухконтурной схеме: промежуточный отчет/ ЭНИН им. Г. М. Кржижановского; рук. темы И. В. Рыбин. М., 1979. 64 с.

References

1. Levenberg V. A., Tkach M. P., Golstrem V. A. Akkumulirovanie tepla [Heat accumulation]. Kiev, Tekhnika Publ., 1991, 112 p. (In Russ.).

2. Vrine E. Issledovanie ustanovki, rabotayushchei v periodicheskom rezhime, dlya akkumulirovaniya tepla skrytoi teploto [Study of a batch-mode installation for heat storage by latent heat]. *Revue Generale de Thermique*, 1983, vol. 22, no. 254. pp. 183-188 (In Russ.).

3. Kobelev N. S., Kotenko E.V., Polozov A.E. *Energoberegayushchie tekhnologii, truboprovody i oborudovanie sistem teplogazosnabzheniya i ventilyatsii* [Energy-saving technologies, pipelines and equipment for heat and gas supply and ventilation systems]. Kursk, 2005, 200 p. (In Russ.).

4. Manasyov P. P., Lihtenshtein E. L. Matematicheskoe i fizicheskoe modelirovanie protsessov teploobmena v akkumulyatore fazovogo perekhoda [Lichtenstein Mathematical and physical modeling of heat transfer processes in a phase transition accumulator]. *Izv. vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura = Izv. universities. Construction and architecture*, 1988, no. 8, pp. 88-92 (In Russ.).

5. Lukashov Yu. M., Tokar B.Z., Kotenko E.V. [Investigation of the characteristics of a heat accumulator at a phase transition]. *Trudy 1-i ros. nats. konf. po teploobmenu* [Transactions of the 1st growth. nat. conf. on heat transfer]. Moscow, 1994, vol. 5, pp. 109-113 (In Russ.).

6. Tokar B.Z., Bykovtsev Yu. S., Kotenko E.V. [An approximate calculation of the temperature of the coolant at the outlet of the phase-transition heat accumulator (discharge mode)]. *Trudy 2-i ros. nats. konf. po teploobmenu* [Transactions of the 2nd growth. nat. conf. on heat exchange]. Moscow, 1998, vol. 7, pp. 217-220 (In Russ.).

7. Tokar B.Z., Kotenko E.V., Tsepochkin V.G. [Calculation of the discharge mode of the phase-transition heat accumulator of the shell-and-tube type]. *Trudy 3-ei ros. nats. konf. po teploobmenu* [Proceedings of the 3rd growing. nat. conf. on heat exchange]. Moscow, 2002, vol. 7, pp. 230-234 (In Russ.).
8. Kotenko E. V. Razrabotka matematicheskoi modeli i metodiki rascheta akkumulyatorov teploty na fazovom perekhode. [Development of a mathematical model and methodology for calculating heat accumulators at a phase transition]. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk. Kursk, 1996, 15 p. (In Russ.).
9. Umerenkov E.V. Razrabotka akkumulyatorov teploty na fazovom perekhode dlya sistem teplosnabzheniya [Development of heat accumulators at the phase transition for heat supply systems]. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk. Kursk, 2013. 18 p. (In Russ.).
10. Tsymbalyuk Yu. V. Issledovanie protsessov s fazovymi perekhodami materialov s plastinchatymi inkluzivami v teplovykh akkumulyatorakh [Investigation of processes with phase transitions of materials with plate inclusions in thermal batteries]. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk. Astrakhan, 2006, 15 p. (In Russ.).
11. Beckman W., Klein S., Duffy J. W. Beckman and others. *Raschet sistem solnechnogo teplosnabzheniya* [Calculation of solar heat supply systems]. Moscow, Energy Publ., 1980, 80 p. (In Russ.).
12. Duffy J. A., Beckman W. A. *Teplovye protsessy s ispol'zovaniem solnechnoi energii* [Thermal processes using solar energy]. Moscow, Mir Publ., 1977, 420 p. (In Russ.).
13. Bystrov V. P., Livchak A. V. [Heat accumulators using a phase transition]. *Voprosy ekonomii teploenergeticheskikh resursov v sistemakh ventilyatsii i teplosnabzheniya*. Sbornik nauch. trudov [Issues of saving heat energy resources in ventilation and heat supply systems. Collection. scientific labor]. Moscow, 1984, pp. 75-90 (In Russ.).
14. Butuzov V. A. Analiz opyta razrabotki i ekspluatatsii gelioustanovok v Krasnodarskom krae [Analysis of experience in the development and operation of solar installations in the Krasnodar Territory]. *Energeticheskaya effektivnost' = Energy Efficiency*, 2002, no. 34, pp. 54-61 (In Russ.).
15. Umerenkova E.V., Umerenkov E.V., Zayko M.D., Shpilko A.A. [Organization of the solar heating operation mode of an individual residential building]. *Pokolenie budushchego: Vzglyad molodykh uchenykh-2018. Sbornik nauchnykh statei 8-oi Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii* [Generation of the future: the View of young scientists-2018. Collection of scientific articles of the 8th international youth scientific conference]. Kursk, 2018, vol. 3, 413 p. (In Russ.).
16. Umerenkov E.V., Kotenko E.V. Modelirovanie protsessa razryadki fazoperekhodnogo akkumulyatora teploty kozhukhotrubnogo tipa [Modeling the process of discharging a phase-transition heat accumulator of a shell-and-tube type]. *Nauchnyi vestnik Voro-*

nezhskogo GASU. *Stroitel'stvo i arkhitektura* = *Scientific Bulletin of Voronezh State Administrative University. Construction and architecture*, 2011, no. 1 (21), pp. 34-39 (In Russ.).

17. Dikhtievsky O.V., Konyukhov G.V., Martynenko O.G., Yurevich I.F. Chislennoe modelirovanie optimal'nogo teplovogo akkumulyatora na fazovom perekhode [Numerical modeling of the optimal heat accumulator at the phase transition]. *IFZh*, 1991, vol. 61, no. 5, pp. 749-753 (In Russ.).

18. Matematicheskaya model' sistemy goryachego vodosnabzheniya s ispol'zovaniem solnechnoi energii, rabotayushchei po trekhkonturnoi skheme. Promezhutochnyi otchet [A mathematical model of a hot water system using solar energy, working on a three-circuit scheme. Interim report]. Moscow, *ENIN im. G. M. Krzhizhanovskogo Publ.*, 1979, 92 p. (In Russ.).

19. Matematicheskaya model' sistemy goryachego vodosnabzheniya s ispol'zovaniem solnechnoi energii, rabotayushchei po dvukhkonturnoi skheme: promezhutochnyi otchet [A mathematical model of a hot water system using solar energy, working on a dual circuit: interim report]. *ENIN im. G. M. Krzhizhanovskogo Publ.*, Moscow, 1979, 64 p. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Умеренков Евгений Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоводоснабжения, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tgv-kstu6@yandex.ru

Evgeny V. Umerenkov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor Heat and Gas Supply Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: tgv-kstu6@yandex.ru

Умеренкова Элина Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоводоснабжения, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tgv-kstu6@yandex.ru

Elina V. Umerenkova, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor Heat and Gas Supply Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: tgv-kstu6@yandex.ru

Семичева Наталья Евгеньевна, кандидат технических наук, доцент, завкафедрой теплогазоводоснабжения, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tgv-kstu6@yandex.ru

Natalia E. Semicheva, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of Heat and Gas Supply Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: tgv-kstu6@yandex.ru