

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

WATER SUPPLY, SEWERAGE, BUILDING SYSTEMS OF WATER RESOURCE PROTECTION

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 2. С. 161–173.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (2): 161–173.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 697.34:621.397:6

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-2-161-173

EDN: MRSGTH

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ГИБРИДНЫХ СОЛНЕЧНЫХ СИСТЕМ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

**Юрий Олегович Кривошеин, Николай Александрович Цветков,
Александр Витальевич Толстых, Татьяна Анатольевна Мирошниченко,
Кристина Александровна Кузнецова**

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия,*

Аннотация. *Актуальность.* Конечность ископаемых видов топлива, экологический вред от их сжигания и увеличивающиеся расходы на добычу стимулируют ускорение энергетического перехода всех стран к использованию возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и развитие экологически чистых и ресурсосберегающих технологий. Подавляющая часть территории России находится в зонах с многолетнемерзлыми грунтами или с сезоннопромерзающими грунтами. Для таких территорий актуально применение ВИЭ, особенно солнечной энергии как наиболее доступной.

Цель работы – совершенствование аппаратно-программного комплекса, направленное на энергосбережение и безопасную круглогодичную работу гибридной солнечной системы горячего водоснабжения.

Материалы и методы. Использована опытно-промышленная гибридная солнечная система горячего водоснабжения с четырьмя вакуумированными трубчатыми коллекторами и солнечной электростанцией с установленной мощностью 5 кВт, расположенная в с. Кафтанчиково Томской области в производственном цехе «НПО ВЭСТ».

© Кривошеин Ю.О., Цветков Н.А., Толстых А.В., Мирошниченко Т.А.,
Кузнецова К.А., 2025

В результате натурного экспериментального испытания аппаратно-программного комплекса показана возможность обеспечивать безопасную работу системы с энергосберегающим эффектом в ночное время при температурах ниже точки заморзания теплоносителя в гидравлическом контуре коллекторов.

Выводы. Установлено, что использование разработанного аппаратно-программного комплекса для гибридной солнечной системы с четырьмя вакуумированными коллекторами позволяет практически свести к минимуму дополнительные тепловые потери, которые не превышают 55,8 % от тепловых потерь нагреваемой воды через стенки бака-аккумулятора.

Ключевые слова: гибридная солнечная система горячего водоснабжения, гидравлический контур коллекторов, температурные режимы в ночное время, годовая энергоэффективность системы

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» Министерства науки и высшего образования РФ (грант в форме субсидии: соглашение от 06.06.2024 № 075-15-2024-234).

Для цитирования: Кривошеин Ю.О., Цветков Н.А., Толстых А.В., Мирошнichenko Т.А., Кузнецова К.А. Энергосберегающий аппаратно-программный комплекс для гибридных солнечных систем горячего водоснабжения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 2. С. 161–173. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-2-161-173. EDN: MRS GTH

ORIGINAL ARTICLE

ENERGY-SAVING HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX FOR HYBRID SOLAR HOT WATER SUPPLY SYSTEMS

Yuri O. Krivoshein, Nikolai A. Tsvetkov, Aleksandr V. Tolstyykh, Tatiana A. Miroshnichenko, Kristina A. Kuznetsova
Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. The finiteness of fossil fuels, environmental damage from their combustion and increasing production costs promote acceleration of the global energy transfer to renewable energy sources and development of eco-friendly and resource-saving technologies. The vast Russian territory is permafrost or areas with seasonally frozen soils. Renewable energy sources are relevant for such territories, especially solar energy as the most affordable.

Purpose: The aim is to improve the hardware-software complex for energy saving and safe year-round operation of the hybrid solar hot water supply system.

Methodology: An experimental-industrial hybrid solar hot water supply system with four evacuated tubular collectors and a solar power plant with an installed capacity of 5 kW is used in the village Kaftanchikovo, Tomsk region, in the production workshop of NPO VEST.

Research findings: The full-scale experimental test is conducted for the hardware-software complex, the ability to ensure safe operation of the system with an energy-saving effect at night at temperatures below the freezing point of the coolant in the hydraulic circuit of the collectors is shown.

Value: It is shown that the use of the proposed hardware-software complex for a hybrid solar system with four evacuated collectors allows to minimize additional heat losses, which do not exceed 55.8 % of the heat loss of water passing through the walls of the storage tank.

Keywords: hybrid solar hot water supply system, hydraulic circuit of collectors, night temperature, energy efficiency

Funding. The work was carried out under the Strategic Academic Leadership Program “Priority-2030” and financially supported by Grant No. 075-15-2024-234 from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

For citation: Krivoshein Yu.O., Tsvetkov N.A., Tolstykh A.V., Miroshnichenko T.A., Kuznetsova K.A. Energy-Saving Hardware-Software Complex for Hybrid Solar Hot Water Supply Systems. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (2): 161–173. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-2-161-173. EDN: MRSGETH

Введение

Рост населения Земли и мировой экономики неразрывно связан с повышением уровня жизни людей и с увеличением потребления тепловой и электрической энергии, чистой воды [1, 2, 3], что ставит перед человечеством глобальные задачи по энерго- и ресурсосбережению. При этом снижение потребления ископаемых видов топлива вынужденно ограничивается не только их конечностью в природе, но и опасностью глобального потепления климата, влияние на интенсивность которого частично связано с выбросом CO₂ при их сжигании [4, 5, 6].

Интенсивно развиваются и активно внедряются энергосберегающие технологии и оборудование с использованием возобновляемых источников энергии. Солнечная энергия является самым большим и доступным из возобновляемых источников энергии. Поэтому использование энергии солнца, поступающей на Землю, для отопления, горячего водоснабжения, охлаждения и вентиляции зданий активно расширяется [7].

Солнечные установки для нагревания воды в настоящее время широко применяются и отличаются большим разнообразием комплектующего оборудования. Однако обязательными элементами являются один или несколько (плоских или с вакуумированными трубками) солнечных коллекторов, от которых тепловая энергия передается теплоносителю. Установка имеет один или несколько баков-аккумуляторов, где теплоноситель в дневное время циркулирует через теплообменники, которые передают полученную в коллекторах тепловую энергию нагреваемой воде. Нагретая вода в баке-аккумуляторе далее используется по назначению.

Оборудование солнечных водонагревательных установок непрерывно совершенствуется в плане повышения их эффективности [8, 9, 10, 11], в том числе с учетом архитектурных решений по расположению элементов систем в здании и на крышах [12].

При установке баков аккумуляторов ниже уровня размещения коллекторов в ночное время возможно возникновение свободной конвекции в гидравлических контурах коллекторов, которая может привести к дополнительным потерям энергии из баков-аккумуляторов в ночное время. Известные натурные исследования солнечных водонагревательных установок при круглогодичной эксплуатации [13, 14] посвящены определению выработки тепловой энергии за год. Однако в годовом тепловом балансе учитывались тепловые потери только через стенки баков-аккумуляторов [13], а для условий холодного климата определялось только количество полученной энергии [14].

В результате натурных исследований температурных режимов гибридных солнечных систем горячего водоснабжения в Якутске [15, 16] установлено, что дополнительные потери могут снизить солнечную фракцию (долю солнечной энергии в потребленной горячей воде) более чем на 39 %.

Натурные исследования температурных режимов гидравлического контура коллекторов [17] в гибридной солнечной системе горячего водоснабжения (ГВС) в с. Кафтанчиково Томской области показали, что возникновение естественной конвекции может быть использовано для уменьшения дополнительных тепловых потерь. Это позволило разработать энергоэффективный метод управления системой в ночное время, исключая или максимально снижающий дополнительные тепловые потери в системе [18] с двумя коллекторами при наружной температуре ниже точки замерзания используемого теплоносителя.

Целью настоящего исследования является определение условий, гарантирующих применение энергоэффективного метода управления системой в ночное время в гибридной солнечной системе с четырьмя коллекторами, в том числе при разборе горячей воды, с оценкой энергосберегающего эффекта в декабре и январе для городов Томска и Якутска.

На рис. 1 показано внешнее оборудование, а на рис. 2 – схема исследуемой гибридной солнечной системы горячего водоснабжения.

Внешнее оборудование гибридной солнечной системы ГВС (рис. 1) включает два ветрогенератора и 12 солнечных панелей, обеспечивающих возобновляемой электрической энергией циркуляционные насосы системы. Максимальная мощность солнечной электростанции составляет 2 кВт, а мощность резервного бензинового генератора – 3 кВт. Четыре вакуумированных трубчатых коллектора ориентированы на юг и обеспечивают выработку тепловой энергии для системы горячего водоснабжения.



Рис. 1. Внешнее оборудование гибридной солнечной системы ГВС, построенной в цехе № 1 «НПО ВЭСТ» в с. Кафтанчиково Томской области

Fig. 1. External equipment of hybrid solar hot water supply system built in workshop No. 1 of NPO VEST in Kaftanchikovo village, Tomsk region

В дневное время после восхода солнца и выполнения обязательного условия $T_{cl} - T_{std} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 2) открывается клапан 8а или 8б и включается цир-

куляционный насос 7 гидравлического контура коллекторов. При этом пропилен-гликолевый теплоноситель при температуре $T_1 = T_{st1}$ из нижней части кольцевого трубчатого теплообменника, расположенного в баке-аккумуляторе 5, поступает через измеритель расхода 6б в манифольды коллекторов 9 (№ 1–4). Манифольды изготовлены из меди и представляют собой трубы с массивными стенками, в которые заделываются при монтаже конденсаторы медных тепловых трубок. Специальная жидкость, заполняющая примерно на 30 % медные герметичные тепловые трубки, частично испаряется при нагревании, и пар движется в конденсаторы, где за счет его конденсации полученная тепловая энергия передается поперечно омываемому теплоносителю в манифольдах коллекторов. Конденсат непрерывно возвращается в нижнюю часть тепловых трубок. Нагретый до температуры T_{c2-out} теплоноситель в манифольдах коллекторов 9 поступает затем в верхнюю часть трубчатого кольцевого теплообменника, расположенного в баке-аккумуляторе 5, при температуре T_{10} . Через стенки этого теплообменника тепловая энергия, полученная от солнца, передается нагреваемой воде в нижней части бака-аккумулятора.

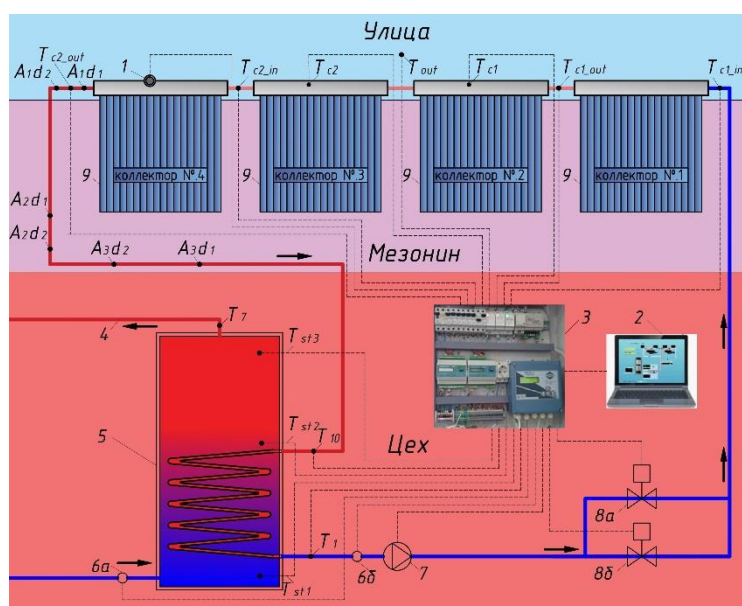


Рис. 2. Схема опытно-промышленной гибридной солнечной системы ГВС с сенсорами контроля
Fig. 2. Circuit of pilot-industrial hybrid solar hot water supply system with control sensors

В ночное время при закрытом клапане 8а или 8б (рис. 2) циркуляция теплоносителя в циркуляционных контурах отсутствует, манифольды коллекторов и тепловые трубки охлаждаются вплоть до температуры окружающей среды T_{out} вместе с трубопроводами, расположенными на улице. Дополнительные тепловые потери тепловой энергии из бака-аккумулятора отсутствуют.

При открытом клапане 8а или 8б и достижении перепада температуры в циркуляционном контуре T_{k2} возникает свободная конвекция теплоносителя (рис. 3), который движется в направлении от коллектора № 4 к коллектору № 1.

Открытие клапана происходит в 18 ч 31 мин (4 апреля 2023 г.) при перепаде температуры $T_{k2} - T_{k1} = 4,2$ °С. Появляются потери тепловой энергии нагретой днем воды в нижней части бака-аккумулятора как дополнительные к основным тепловым потерям через стенки бака-аккумулятора. Охлаждение воды за счет естественной конвекции завершено после восхода солнца в 9 ч 44 мин 5 апреля 2023 г. Длительность процесса дополнительного охлаждения составила 15 ч 14 мин. Как показано в работах [16, 17], дополнительные тепловые потери возникают в любое время года. В зимнее время дополнительные тепловые потери будут больше, чем в летнее.

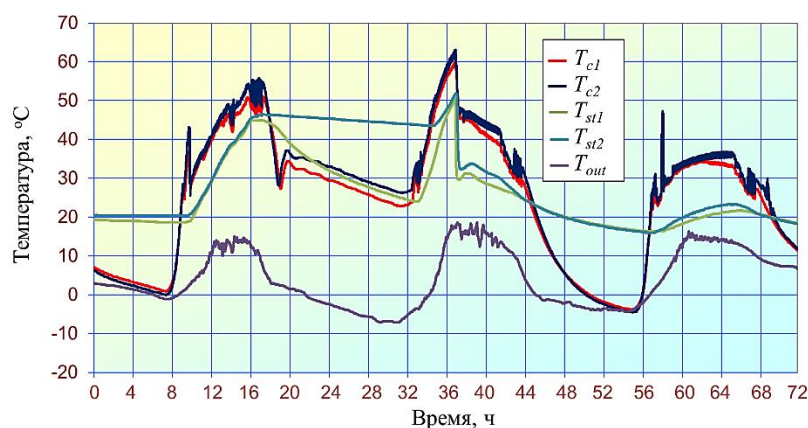


Рис. 3. Тепловые режимы солнечной системы ГВС и коллекторов № 2 (T_{c1}) и № 3 (T_{c2}) за период 4–6 апреля 2023 г. [18]

Fig. 3. Thermal modes of solar hot water supply system and collectors No. 2 (T_{c1}) and No. 3 (T_{c2}) on April 4–6, 2023 [18]

В работе [18] выполнен расчет дополнительных тепловых потерь.

Потери через стенки бака-аккумулятора в верхней и нижней его половине были приняты равными и составили 9,196 МДж. Суммарные тепловые потери составили 24,244 МДж. Дополнительные тепловые потери, обусловленные естественной конвекцией в гидравлическом контуре коллекторов, составили 15,048 МДж. Эти потери составляют 163,64 % в сравнении с тепловыми потерями через стенки бака-аккумулятора.

Для снижения дополнительных тепловых потерь был использован метод, предложенный в работе [17] (рис. 4).

Во время эксперимента наружная температура снижалась с $-3,4$ до $-26,4$ °С. Наблюдался сильный ветер. Температура в помещении, где располагался бак-аккумулятор, снизилась с $22,8$ до $15,6$ °С. Как и следовало ожидать, значительно выросли тепловые потери через стенки бака-аккумулятора и тепловые потери в гидравлическом контуре коллекторов при периодическом его нагревании и охлаждении. Расчеты по методике, изложенной в работе [18], показали, что общие тепловые потери от нагретой воды за ночь составили 53,4 МДж, а через стенки бака-аккумулятора тепловые потери составили 34,3 МДж. Дополнительные тепловые потери составили 19,1 МДж, что соответ-

ствуует 55,8 % от тепловых потерь через стенки бака-накопителя. Эта относительная цифра значительно меньше, чем 163,4 % при открытом клапане (см. рис. 3).

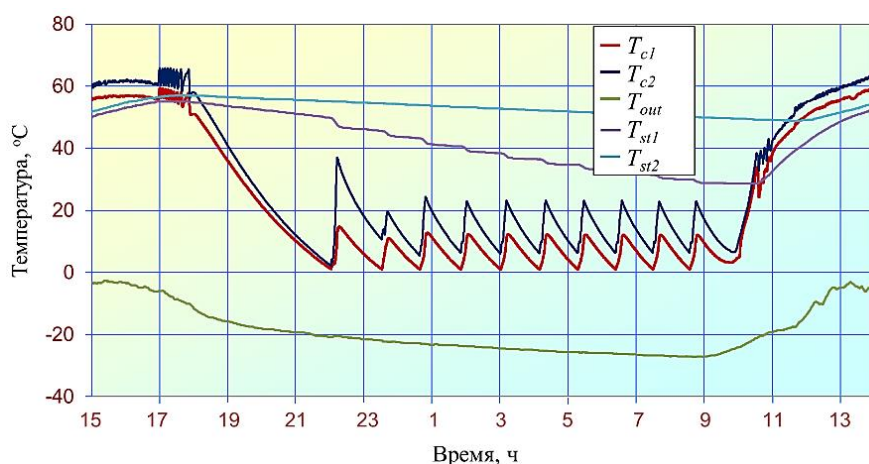


Рис. 4. Температурные режимы солнечной системы горячего водоснабжения с четырьмя коллекторами (15–16 февраля 2023 г.)

Fig. 4. Temperature conditions of solar hot water system with four collectors (February 15–16, 2023)

С учетом того, что тепловые потери от бака-аккумулятора за сутки будут практически в 2 раза больше, чем только за ночь, можно приблизительно оценить эффективность использования предложенного метода за каждые сутки в течение года с учетом температуры замерзания используемого теплоносителя и ограничений изготовителей солнечных коллекторов по допустимой температуре $T_{\min}$ их эксплуатации ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$).

На рис. 5 и 6 представлены графики хода температуры воздуха в Томске в декабре 2023 г. и в январе 2024 г. по архивным данным Томской метеостанции¹. Выполним анализ работы солнечной системы ГВС (см. рис. 1 и 2) при выборе температуры замерзания теплоносителя.

Если использовать теплоноситель с точкой замерзания $T_3 = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$, то аппаратно-программный комплекс настроит следующие параметры управления: температура открытия клапана $T_{c1o} = T_{c1} = -25\text{ }^{\circ}\text{C}$, а закрытие управляемого клапана по установленной температуре $T_{c2s} = T_{c2} = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом максимальное снижение дополнительных потерь тепловой энергии из бака-аккумулятора произошло бы 5, 7–14, 17–19 декабря 2023 г. (см. рис. 4) в течение 12 сут. А в январе 2024 г. (рис. 5) соответственно 4, 16 и 22 января (3 сут). За 15 сут дополнительные тепловые потери приблизительно составили бы только $15 \cdot 34,3 \cdot 0,558 = 287,1\text{ МДж}$. Без использования метода управления температурными режимами коллекторов дополнительные потери составили бы $15 \cdot 34,3 \cdot 1,634 = 840,7\text{ МДж}$.

При использовании теплоносителя с температурой точки замерзания $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ дополнительные потери были бы исключены в течение года.

¹ Статистика погоды в Томске. URL: <https://pogoda.vtomske.ru/tomsk/25/01> (дата обращения: 16.01.2025).

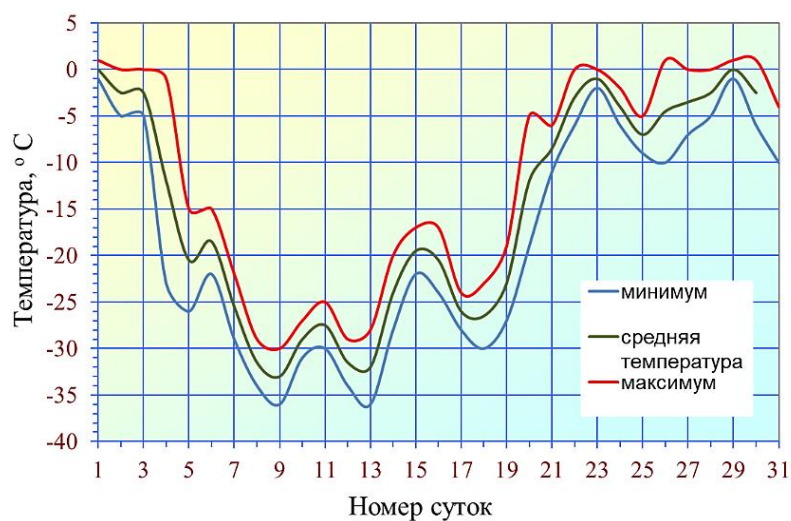


Рис. 5. График хода температуры воздуха в Томске в декабре 2023 г.
Fig. 5. Air temperature chart in Tomsk in December 2023

Анализ данных, приведенных на рис. 6, показал, что минимальные дополнительные тепловые потери были бы только 4, 16 и 19 января (3 сут), при этом потери составили бы $3 \cdot 34,3 \cdot 0,558 = 57,4$ МДж.

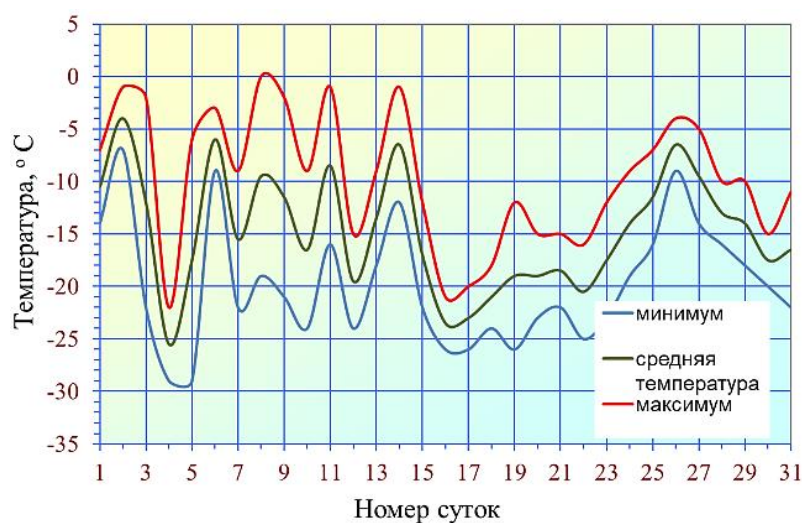


Рис. 6. График хода температуры воздуха в Томске в январе 2024 г.
Fig. 6. Air temperature chart in Tomsk in January 2024

На рис. 7 и 8 приведены графики хода температуры воздуха в Якутске в декабре 2023 г. и в январе 2024 г.

Анализ представленных графиков показал, что при использовании температуры точки замерзания теплоносителя $T_3 = -40$ °C и ограничении темпера-

туры эксплуатации коллекторов (-40°C) метод управления температурными режимами коллекторов был бы применен 57 дней, кроме 1 декабря 2023 г. и 24–27 января 2024 г. (5 сут). При этом минимальные дополнительные потери за 2 месяца приблизительно составят $57 \cdot 34,3 \cdot 0,558 = 1090,9$ МДж. Дополнительные потери тепловой энергии системы в ночное время с открытым клапаном за это время составят приблизительно $57 \cdot 34,3 \cdot 1,634 = 3194,6$ МДж. Эффект энергосбережения при использовании метода за эти месяцы – 2103,7 МДж. За год этот эффект может быть в 6–7 раз выше, поскольку система будет эксплуатироваться с закрытым управляемым клапаном в ночное время.

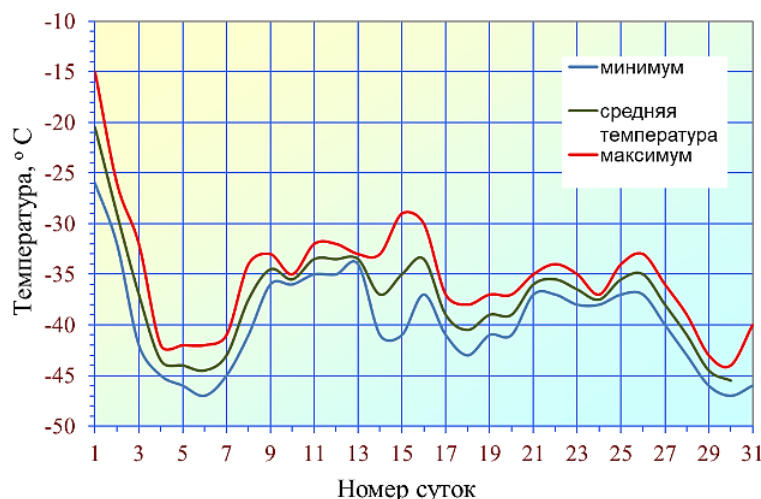


Рис. 7. График хода температуры воздуха в Якутске в декабре 2023 г.
Fig. 7. Air temperature chart in Yakutsk in December 2023



Рис. 8. График хода температуры воздуха в Якутске в январе 2024 г.
Fig. 8. Air temperature chart in Yakutsk in January 2024

Гарантированное максимальное снижение дополнительных тепловых потерь тепловой энергии, как показано выше, обеспечивается тем, что команды на открытие и закрытие управляемого клапана в гидравлическом контуре коллекторов в ночное время выполняются только с поэтапной проверкой выполнения следующих условий:

$$T_{out} < T_3; \quad (1)$$

$$T_3 = T_{\min \varepsilon}; \quad (2)$$

$$T_{st2} - T_{st1} > 4,2 \text{ }^{\circ}\text{C}; \quad (3)$$

$$T_{c10} - T_3 = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}; \quad (4)$$

$$T_{c23} - T_3 = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}. \quad (5)$$

Условия (1) – (5) позволяют получить максимальный эффект снижения дополнительных тепловых потерь в ночное время при круглогодичной эксплуатации комбинированных солнечных систем горячего водоснабжения. При этом снижается расход органического топлива для компенсации дополнительных тепловых потерь и уменьшаются вредные выбросы продуктов его сгорания.

При неуправляемом отборе горячей воды в ночное время (см. рис. 3) разность температур в средней и нижней части бака-аккумулятора снижается в пределе до значений $T_{st2} - T_{st1} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$. При разности этих температур $T_{st2} - T_{st1} < 4,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ свободная конвекция в гидравлическом контуре коллекторов возникнуть не может. В такой ситуации условие (3) будет нарушено. Дополнительные потери уменьшить будет невозможно путем периодического прогревания гидравлического контура коллекторов, как показано на рис. 4. Поэтому за 2 ч до заката солнца и после закрытия управляемого клапана в гидравлическом контуре коллекторов отслеживается выполнение условия (3) путем снижения или прекращения отбора горячей воды при наружных температурах воздуха ниже точки замерзания применяемого теплоносителя.

При использовании более дешевого теплоносителя с точкой замерзания T_3 выше ограничения допустимой минимальной температуры эксплуатации $T_{\min \varepsilon}$ следует оценить получаемый экономический эффект энергосбережения и разницу затрат на такой теплоноситель. Если эффект энергосбережения будет больше, то условие (2) может быть изменено.

Выводы

1. Аппаратно-программный комплекс системы должен обеспечивать открытие управляемого клапана в ночное время при условии $T_{st2} - T_{st1} > 4,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ по установленной температуре T_{c10} коллектора № 2, а закрытие управляемого клапана – по установленной температуре T_{c23} коллектора № 3. Это позволит уменьшить дополнительные тепловые потери за счет снижения влияния тепловой инерции манифольдов коллекторов при управлении системой.

2. Аппаратно-программный комплекс системы должен обеспечивать разность между установленной температурой открытия управляемого клапана T_{c10} и температурой точки замерзания применяемого теплоносителя T_3 , равной $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Это позволит максимально снизить дополнительные тепловые потери системы.

3. С учетом рекомендаций изготовителей солнечных вакуумированных коллекторов по температуре их эксплуатации $T_{\min \varepsilon}$ аппаратно-программный

комплекс системы должен обеспечивать в ночное время открытие управляемого клапана при выполнении условия $T_{c10} - T_{min \varnothing} = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

4. Отбор горячей воды из вертикальных напорных баков-аккумуляторов после захода солнца должен прекращаться, если $T_{st2} - T_{st1} < 4,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, для обеспечения безопасной работы системы при температурах наружного воздуха ниже точки замерзания используемого в системе пропилен-гликолевого теплоносителя.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Avtar R., Tripathi S., Aggarwal A.K., et al. Population – urbanization – energy nexus: a review // Resources. 2019. V. 8 (3). 21 p. DOI: 10.3390/resources8030136
2. Balatsky A.V., Balatsky G.I., Borysov S.S. Resource demand growth and sustainability due to increased world consumption // Sustainability. 2015. V. 7 (3). P. 3430–3440. DOI: 10.3390/su7033430
3. Klemeš J.J., Varbanov P.S., Lam H. L., et al. Energy, water and environmental footprint interactions: implications for the major economy sectors of Europe, South East Asia and Worldwide // Procedia Engineering. 2016. V. 148. P. 1199–1205. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.630
4. Imasiku K., Ntagwirumugara E. An impact analysis of population growth on energy-water-food-land nexus for ecological sustainable development in Rwanda // Food and Energy Security. 2019. V. 9 (1). 17 p. DOI: 10.1002/fes3.185
5. Sarkar M., Chung B.D. Effect of Renewable Energy to Reduce Carbon Emissions under a Flexible Production System: A Step toward Sustainability // Energies. 2021. V. 14 (1). 215. DOI: 10.3390/en14010215
6. Tsvetkov P. Climate Policy Imbalance in the Energy Sector: Time to Focus on the Value of CO₂ Utilisation // Energies. 2021. V. 14 (2). 411. DOI: 10.3390/en14020411
7. Rahi M.R., Ostadi S., Rahmani A., Dibaj M., Akrami M. Studying the Improvement of Solar Collector Mechanism with Phase Change Materials // Energies 2024. V. 17. 1432. URL: <https://doi.org/10.3390/en17061432>
8. Бубенчиков А.А., Овсянников А.Ю., Николаев М.В. и др. Эффективность преобразования солнечной энергии // Молодой ученый. 2016. № 28.2 (132.2). С. 46–50. URL: <https://moluch.ru/archive/132/36969/>
9. Croitoru C., Bode F., Calotă R., Berville C., Georgescu M. Harnessing Nanomaterials for Enhanced Energy Efficiency in Transpired Solar Collectors: A Review of Their Integration in Phase-Change Materials // Energies. 2024. V. 17. 1239. DOI: 10.3390/en17051239
10. Cao L., Yu J., Liu X., Wang Z. Evaluation Method and Analysis on Performance of Diffuser in Heat Storage Tank // Energies. 2024. V. 17. 618. DOI: 10.3390/en17030618
11. Hamdan M., Abdelhafez E., Ajib S., Sukkariyih M. Improving Thermal Energy Storage in Solar Collectors: A Study of Aluminum Oxide Nanoparticles and Flow Rate Optimization // Energies. 2024. V. 17. 276. DOI: 10.3390/en17020276
12. Shu Yu. Project of Building: Solar Hot Water // Bulletin of Science and Practice. 2023. V. 9. № 6. P. 408–414. DOI: 10.33619/2414-2948/91/48. EDN: VVRRNU
13. Maraj A., Londo A., Gebremedhin A., Firat C. Energy performance analysis of a forced circulation solar water heating system equipped with a heat pipe evacuated tube collector under the Mediterranean climate conditions // Renewable Energy. 2019. V. 140. P. 874–883. DOI: 10.1016/j.renene.2019.03.109
14. Popsueva V., Lopez A.F.O., Kosinska A., Nikolaev O., Balakin B.V. Field Study on the Thermal Performance of Vacuum Tube Solar Collectors in the Climate Conditions of Western Norway // Energies. 2021. V. 14. 2745. DOI: 10.3390/en14102745
15. Tsvetkov N.A., Krivoshein Y.O., Khutornoi A.N., Boldyryev S., Petrova A.V. Development of the Computer-Aided Application for the Use of Solar Energy in the Hot Water Supply System of Russian Permafrost Regions // Chem. Eng. Trans. 2020. V. 81. P. 943–948. DOI: 10.3303/CET2081158
16. Tsvetkov N.A., Krivoshein U.O., Tolstykh A.V., Khutornoi A.N., Boldyryev S. The calculation of solar energy used by hot water systems in permafrost region: An experimental case study for Yakutia // Energy. 2020. V. 210. 118577. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118577

17. Tsvetkov N., Boldyryev S., Shilin A., Krivoshein Y., Tolstykh A. Hardware and Software Implementation for Solar Hot Water System in Northern Regions of Russia // *Energies*. 2022. V. 15. 1446. DOI: 10.3390/en15041446
18. Кривошеин Ю.О., Цветков Н.А., Толстых А.В., Кузнецова К.А., Жанатұлы А.В. Энергоэффективность солнечных систем горячего водоснабжения при температурах ниже точки замерзания теплоносителя // Инвестиции, градостроительство, технологии как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения : материалы XIV Международной научно-практической конференции. В 2 частях. Томск, 2024. С. 546–555. EDN: PFVGPS

REFERENCES

1. Avtar R., Tripathi S., Aggarwal A.K., et al. Population–Urbanization–Energy Nexus: A Review. *Resources*. 2019; 8 (3): 136. DOI: 10.3390/resources8030136
2. Balatsky A.V., Balatsky G.I., Borysov S.S. Resource Demand Growth and Sustainability Due to Increased World Consumption. *Sustainability*. 2015; 7 (3): 3430–3440. DOI: 10.3390/su7033430
3. Klemeš J.J., Varbanov P.S., Lam H. L., et al. Energy, Water and Environmental Footprint Interactions: Implications for the Major Economy Sectors of Europe, South East Asia and Worldwide. *Procedia Engineering*. 2016; 148: 1199–1205. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.630
4. Imasiku K., Ntagwirumugara E. An Impact Analysis of Population Growth on Energy-Water-Food-Land Nexus for Ecological Sustainable Development in Rwanda. *Food and Energy Security*. 2020; 9 (1): 185. DOI: 10.1002/fes3.185
5. Sarkar M., Chung B.D. Effect of Renewable Energy to Reduce Carbon Emissions under a Flexible Production System: A Step toward Sustainability. *Energies*. 2021; 14 (1): 215. DOI: 10.3390/en14010215
6. Tsvetkov, P. Climate Policy Imbalance in the Energy Sector: Time to Focus on the Value of CO₂ Utilisation. *Energies*. 2021; 14: 411. DOI: 10.3390/en14020411
7. Rahi M. R., Ostadi S., Rahmani A., Dibaj M., Akrami M. Studying the Improvement of Solar Collector Mechanism with Phase Change Materials. *Energies*. 2024; 17: 1432. DOI: 10.3390/en17061432
8. Bubenchikov A.A., Ovsyannikov A.Yu., Nikolaev M.V., et al. The Effectiveness of Converting Solar Energy. *Molodoi uchenyi*. 2016; 28.2 (132.2): 46–50. <https://moluch.ru/archive/132/36969/> (In Russian)
9. Croitoru C., Bode F., Calotă, R., Berville C., Georgescu M. Harnessing Nanomaterials for Enhanced Energy Efficiency in Transpired Solar Collectors: A Review of Their Integration in Phase-Change Materials. *Energies*. 2024; 17: 1239. DOI: 10.3390/en17051239
10. Cao L., Yu J., Liu X., Wang Z. Evaluation Method and Analysis on Performance of Diffuser in Heat Storage Tank. *Energies*. 2024; 17: 618. DOI: 10.3390/en17030618
11. Hamdan M., Abdelhafez E., Ajib S., Sukkariyih M. Improving Thermal Energy Storage in Solar Collectors: A Study of Aluminum Oxide Nanoparticles and Flow Rate Optimization. *Energies*. 2024; 17: 276. DOI: 10.3390/en17020276
12. Shu Yu. Project of Building: Solar Hot Water. *Bulletin of Science and Practice*. 2023; 9 (6): 408–414. DOI: 10.33619/2414-2948/91/48. EDN: VVRRNU
13. Maraj A., Londo A., Gebremedhin A., Firat C. Energy Performance Analysis of a Forced Circulation Solar Water Heating System Equipped with a Heat Pipe Evacuated Tube Collector under the Mediterranean Climate Conditions. *Renewable Energy*. 2019; 140: 874–883. DOI: 10.1016/j.renene.2019.03.109
14. Popsueva V., Lopez A.F.O., Kosinska A., Nikolaev O., Balakin B.V. Field Study on the Thermal Performance of Vacuum Tube Solar Collectors in the Climate Conditions of Western Norway. *Energies*. 2021; 14: 2745. DOI: 10.3390/en14102745
15. Tsvetkov N.A., Krivoshein Y.O., Khutornoi A.N., Boldyryev S., Petrova A.V. Development of the Computer-Aided Application for the Use of Solar Energy in the Hot Water Supply System of Russian Permafrost Regions. *Chemical Engineering Transactions*. 2020; 81: 943–948. DOI: 10.3303/CET2081158
16. Tsvetkov N.A., Krivoshein Y.O., Tolstykh, A.V., Khutornoi A.N., Boldyryev, S. Hardware and Software Implementation for Solar Hot Water System in Northern Regions of Russia. *Energies*. 2022; 15: 1446. DOI: 10.3390/en15041446

17. Tsvetkov N., Boldyryev S., Shilin A., Krivoshein Y., Tolstykh A. Hardware and Software Implementation for Solar Hot Water System in Northern Regions of Russia. *Energies*. 2022; 15: 1446. DOI: 10.3390/en15041446
18. Krivoshein Yu.O., Tsvetkov N.A., Tolstykh A.V., Kuznetsova K.A., Zhanatula A.V. Energy Efficiency of Hot Water Supply Systems at Temperatures below the Freezing Point of Coolant. In: *Prov. 14th Int. Sci. Conf. 'Investments, Construction, Real Estate as Drivers of Socio-Economic Development and Life Quality of Population'*. Tomsk, 2024. Pp. 546–555. (In Russian)

Сведения об авторах

Кривошеин Юрий Олегович, ст. преподаватель, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, krivoshein@npowest.ru

Цветков Николай Александрович, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, nac.tsuab@yandex.ru

Толстых Александр Витальевич, канд. физ.-мат. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, tolstbu@yandex.ru

Мирошниченко Татьяна Анатольевна, канд. физ.-мат. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, miroshka_78@mail.ru

Кузнецова Кристина Александровна, ст. преподаватель, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, ka-kuznetsova@bk.ru

Authors Details

Yuriy O. Krivoshein, Senior Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, krivoshein@npowest.ru

Nikolai A. Tsvetkov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, nac.tsuab@yandex.ru

Aleksandr V. Tolstykh, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, sinvintie@rambler.ru

Tatiana A. Miroshnichenko, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, miroshka_78@mail.ru

Kristina A. Kuznetsova, Senior Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, ka-kuznetsova@bk.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 19.02.2025
Одобрена после рецензирования 12.03.2025
Принята к публикации 13.03.2025

Submitted for publication 19.02.2025
Approved after review 12.03.2025
Accepted for publication 13.03.2025