
ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ НАСЕЛЕННЫХ МЕСТ, ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА

LIFE MAINTENANCE ENGINEERING SYSTEMS OF THE INHABITED LOCALITIES, BUILDINGS AND STRUCTURES. ECOLOGICAL SAFETY OF CONSTRUCTION

Известия вузов. Строительство. 2022. № 5. С. 67–84.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2022; (5): 67–84.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 696.4:697.7

DOI: 10.32683/0536-1052-2022-761-5-67-84

УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО КОНТУРА КОЛЛЕКТОРОВ СОЛНЕЧНЫХ СИСТЕМ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ В НОЧНОЕ ВРЕМЯ

**Николай Александрович Цветков, Юрий Олегович Кривошеин,
Александр Витальевич Толстых, Юлия Николаевна Дорошенко**
Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия

Аннотация. Представлены результаты натурных экспериментальных исследований особенностей режимов работы гибридной солнечной опытно-промышленной водонагревательной установки при отрицательных температурах наружного воздуха. Выполнена оценка снижения производительности обледеневших коллекторов по сравнению с очищенными от снега и льда. Выявлено снижение энергоэффективности установки, обусловленное возможностью включения циркуляционного насоса в ночное время для предотвращения замерзания. Установлено, что разность температур в нижней и средней частях бака-аккумулятора увеличивается с момента заката солнца и достигает максимальной величины утром при первом включении циркуляционного насоса. Предложены решения, обеспечивающие исключение замерзания теплоносителя в гидравлических контурах коллекторов в ночное время: реализован режим управления соленоидным клапаном с целью изменения температуры коллекторов в заданном диапазоне с минимумом тепловых потерь из бака-аккумулятора. Для предотвращения снижения температуры теплоносителя ниже допустимого уровня можно использовать одновременное включение насоса и клапана на определенное заранее время в четвертом или последующих циклах его открытия и закрытия.

Ключевые слова: солнечная система горячего водоснабжения, гидравлический контур коллекторов, свободная конвекция теплоносителя, соленоидный клапан, аппаратно-программный комплекс

Благодарности: публикация выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (научная тема FEMN-2022-0003).

Для цитирования: Цветков Н.А., Кривошеин Ю.О., Толстых А.В., Дорошенко Ю.Н. Управление режимами работы гидравлического контура коллекторов солнечных систем горячего водоснабжения в ночное время // Известия вузов. Строительство. 2022. № 5. С. 67–84. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-761-5-67-84.

Original article

MODE CONTROL OF HYDRAULIC CIRCUIT OF SOLAR HOT WATER SYSTEM COLLECTORS DURING THE NIGHT TIME

**Nikolay A. Tsvetkov, Yuriy O. Krivoshein, Aleksandr V. Tolstykh,
Yuliya N. Doroshenko**

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. The article presents the results of full-scale experimental studies of the features of the operation modes of a hybrid solar pilot water heating plant at negative outdoor temperatures. An assessment was made of the decrease in the performance of ice-covered collectors in comparison with those cleared of snow and ice. A decrease in the energy efficiency of the installation was revealed, due to the possibility of turning on the circulation pump at night to prevent freezing. It has been established that the temperature difference in the lower and middle parts of the storage tank increases from the moment the sun sets and reaches its maximum value in the morning when the circulation pump is turned on for the first time. Solutions are proposed to ensure the exclusion of freezing of the coolant in the hydraulic circuits of the collectors at night: a solenoid valve control mode is implemented to change the temperature of the collectors in a given range with a minimum of heat losses from the storage tank. To prevent the coolant temperature from dropping below the permissible level, you can use the simultaneous activation of the pump and the valve for a predetermined time in the fourth or subsequent cycles of its opening and closing.

Keywords: solar hot water system, hydraulic circuit of collectors, free convection of heat carrier, solenoid valve, hardware and software complex

Acknowledgments: the publication was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (scientific topic FEMN-2022-0003).

For citation: Tsvetkov N.A., Krivoshein Yu.O., Tolstykh A.V., Doroshenko Yu.N. Mode control of hydraulic circuit of solar hot water system collectors during the night time. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2022; (5): 067–84. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2022-761-5-67-84.

1. Введение. Увеличение численности населения на нашей планете, повышение уровня жизни людей требуют роста мировой экономики, что неразрывно связано с возрастанием потребления тепловой и электрической энергии [1]. Использование ископаемых видов топлива для производства энергии сдерживается вредными выбросами при их сжигании, которые оказывают большое влияние с точки зрения изменения климата и здоровья человека и биологических систем в целом [2]. В данной работе подчеркивается, что сдвиг в энергетической парадигме от ископаемого топлива к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) срочно необходим природе и обществу – это называется энергетическим (низкоуглеродным) переходом. Страны с дефи-

цитом или отсутствием запасов ископаемых видов топлива стремятся обеспечить энергетическую безопасность за счет активного использования ВИЭ. Например, странами Европейского союза поставлена грандиозная цель («Европейская зеленая сделка») – достичь к 2050 г. нулевых выбросов парниковых газов [3]. Понимание угрозы опасного изменения климата на Земле объединяет практически все страны в стремлении осуществить переход, требующий значительного роста проникновения возобновляемых источников энергии в энергетические системы, чтобы в конечном итоге достичь цели нулевого углерода [4]. В работе [5] оценивается влияние возобновляемых источников энергии на сокращение выбросов углерода в рассмотренной гибкой производственной системе и трактуется как шаг к устойчивости.

Энергетический переход, безусловно, длительный период. Но глобальное потепление – это реальная угроза человечеству, и быстрый переход в энергетике станет определяющей социальной, политической и технической проблемой XXI в. [6]. Один из путей стимулирования быстрого перехода в энергетике предлагается в [7] за счет регулирования выбросов углерода на границе стран путем неявных изменений цен на продукцию. Такое регулирование предполагает перенос сокращений выбросов углерода в страны, не соблюдающие сокращение выбросов.

Накоплен огромный научный и практический опыт получения энергии из возобновляемых источников с оценкой и преимуществами каждого источника с учетом природных условий конкретных стран. Использование солнечной энергии как независимого от границ стран источника, в том числе и для северных территорий, – наиболее перспективно для получения тепловой и электрической энергии [8].

Потребление энергии в зданиях [9, 10] составляет значительную часть энергопотребления во всем мире. Мировое потребление энергии строительным сектором – 32 %, он является одним из крупнейших источников изменения климата и выбросов CO₂ [11]. Для получения тепловой и электрической энергии широко используются встроенные в здания солнечные системы с коллекторами и с фотоэлектрическими панелями соответственно. Эти системы непрерывно совершенствуются и значительно сокращают углеродный след.

Солнечная система водяного отопления/охлаждения потенциально может обеспечить более 50 % потребности дома в энергии бесплатно со значительным сокращением углеродного следа [12]. В работе система коллектор-охладитель с 65 плоскими пластинами общей площадью 130 м² была интегрирована с котлом и использовалась для обеспечения отопления и охлаждения трехэтажного здания (1500 м²) в университете Аль-Байт (Иордания).

В [13] классифицированы и исследованы различные стратегии охлаждения фотоэлектрических кремниевых преобразователей солнечной энергии. Применение пассивного или активного охлаждения фотоэлектрических модулей гарантирует улучшение их производительности от 3 до 30 %. Результаты тематического исследования [14], проведенного на солнечной фотоэлектрической установке, показали важность использования данных о солнечной радиации с местных наземных метеорологических станций вследствие несоответствия между фактической генерируемой мощностью и техническим солнечным потенциалом.

Суточная тепловая эффективность вакуумных трубчатых солнечных коллекторов [15] с использованием материала с фазовым переходом и без него варьировалась в диапазоне 42–55 и 79–87 % соответственно. Тем не менее суточная энергоэффективность коллектора, в который был интегрирован материал с фазовым переходом, была на 37,56; 35,31; 36,69; 32,34 и 32,73 % выше, чем у вакуумного трубчатого коллектора без материала с фазовым переходом для расхода воды 8, 12, 16, 20 и 24 л/ч соответственно.

Российская Федерация, огромная часть территории которой является северной (более половины территории – вечная мерзлота), имеет статус геологической сверхдержавы [3] с достаточным уровнем ископаемых видов топлива для внутреннего пользования и экспорта. Несмотря на это в России уже реализовано много различных пилотных проектов потребления солнечной энергии. В последние годы работа, связанная с энергетическим переходом, поднимается на новый качественный уровень в соответствии со стратегией научно-технологического развития Российской Федерации [16].

Наиболее значимым реализованным пилотным проектом, на наш взгляд, является строительство квартала энергоэффективных жилых многоквартирных домов для переселения в них из аварийного жилья жителей г. Якутска. Эти дома и построенный детский садик «Василек» имеют энергоэффективные ограждающие конструкции и оснащены гибридными солнечными системами горячего водоснабжения (ГВС). С использованием разработанного программно-аппаратного комплекса с внешним доступом [17–26] выполнено детальное исследование этих систем, результаты которого представлены в [27, 28]. Они позволили установить, что годовая солнечная фракция систем составляет всего 28 против 51 %, заложенных в проекте. Это связано с потерями тепловой энергии из трех баков-аккумуляторов по 1000 л в каждой системе за счет возникновения естественной конвекции теплоносителя в контурах коллекторов в ночное время.

Экспериментальные данные для г. Якутска были получены на солнечной водонагревательной установке (СВНУ). Ее схема показана на рис. 1.

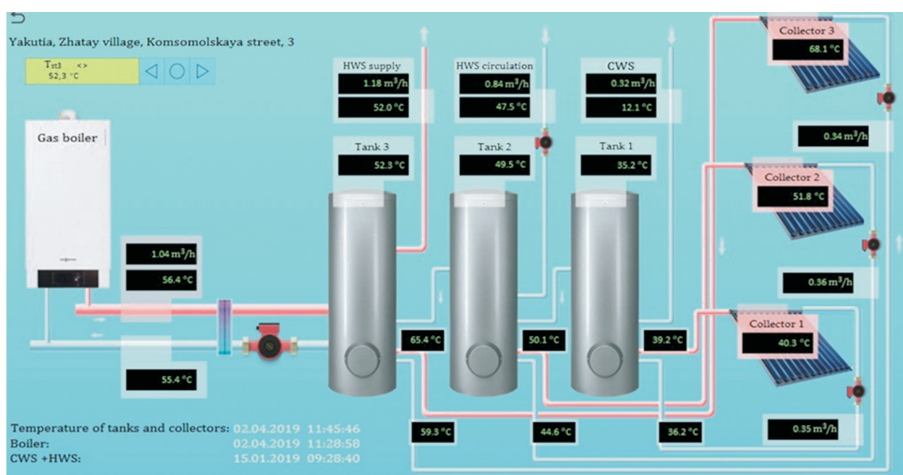


Рис. 1. Мнемосхема солнечной водонагревательной установки в Якутске

Fig. 1. Mnemonic diagram of a solar water heating installation in Yakutsk

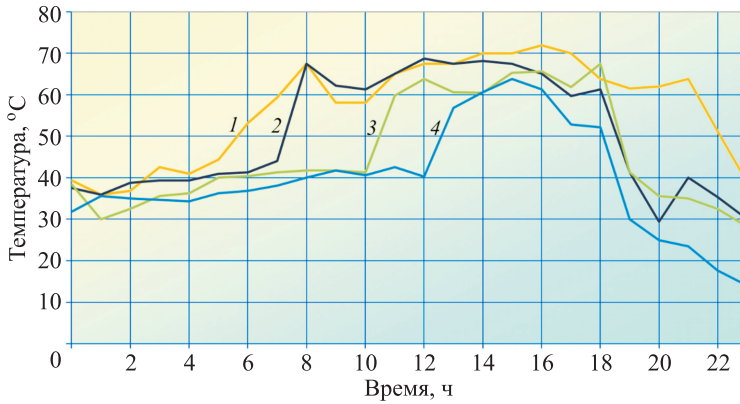


Рис. 2. Температура группы вакуумных коллекторов бака-аккумулятора в солнечные дни

1 – 27.06.2017 г. (30 °С); 2 – 08.04.2018 г. (3 °С); 3 – 11.03.2018 г. (–16 °С); 4 – 25.02.2018 г. (–24 °С)

Fig. 2. The temperature of the group of vacuum collectors of the storage tank on sunny days

1 – 27.06.2017 (30 °С); 2 – 08.04.2018 (3 °С); 3 – 11.03.2018 (–16 °С); 4 – 25.02.2018 (–24 °С)

Влияние естественной конвекции на снижение температуры теплоносителя можно оценить, исходя из графиков, представленных на рис. 2. Там же приведены температуры группы вакуумных коллекторов бака-аккумулятора в солнечные дни. Показания датчика температуры коллекторов с 0 ч до восхода солнца (левая часть рис. 2) изменяются в пределах от 30 до 42 °С для средних суточных температур наружного воздуха от 30 до –24 °С. После заката солнца (правая часть рис. 2) показания датчика снижаются. Наиболее заметно снижение температуры коллекторов 25.02.2018 г. В 23 ч температура приняла значение 15 °С, в то время как в 0 ч она составляла 39 °С, а в 1 ч – 30 °С. Такое возможно только после возникновения естественной конвекции в гидравлическом контуре, при которой неизбежны тепловые потери из всех трех баков-аккумуляторов системы ГВС. Эти потери компенсируются тепловой энергией от газового котла в ночное время.

При закрытии вентилем циркуляционного контура коллекторов этой группы после захода солнца (рис. 3) наблюдается снижение температуры коллекторов в ночное время практически до температуры окружающей среды. Тепловые потери от всех элементов гидравлического контура будут связаны только с потерей их энтальпии.

Дальнейший анализ потерь тепловой энергии, связанных с возникновением естественной конвекции теплоносителя в контурах коллекторов [29], проводился на экспериментальной установке, разработанной и построенной для горячего водоснабжения производственного цеха № 1 научно-производственного объединения «Внедрение энергосберегающих технологий» (НПО ВЭСТ) в с. Кафтанчиково, по ул. Совхозная, 37В (18 км от г. Томска). Контролировать изменение основных параметров работы СВНУ в реальном режиме времени позволяет мнемосхема, представленная на рис. 4.

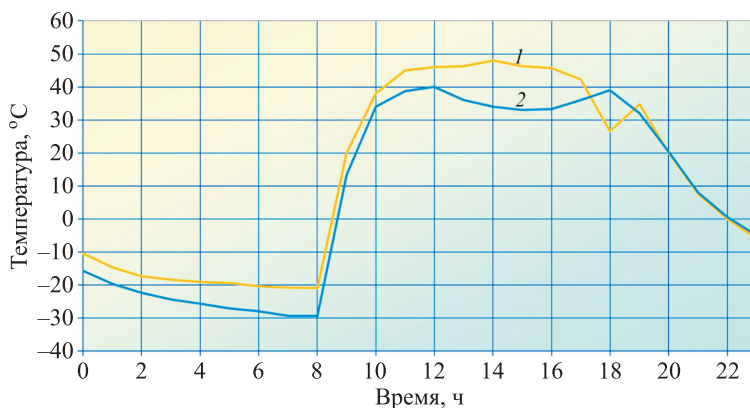


Рис. 3. Контролируемая температура группы вакуумных коллекторов бака-аккумулятора

1 – 15.03.2019 г. (солнечный день); 2 – 20.03.2019 г. (облачный день)

Fig. 3. Controlled temperature of a group of evacuated tube solar collectors

1 – 15.03.2019 (sunny day); 2 – 20.03.2019 (cloudy day)

Полученные данные [29] показали, что использование соленоидного клапана 8 (рис. 5) в циркуляционных контурах коллекторов позволит повысить годовую солнечную фракцию систем горячего водоснабжения в г. Якутске с 28 до 51 %.

В [30–32] разработана модель работы гибридной солнечной системы ГВС. Модель основана на использовании пятилетних данных метеонаблюдений инсоляции в Якутске. Расчетные данные изменения температуры коллек-

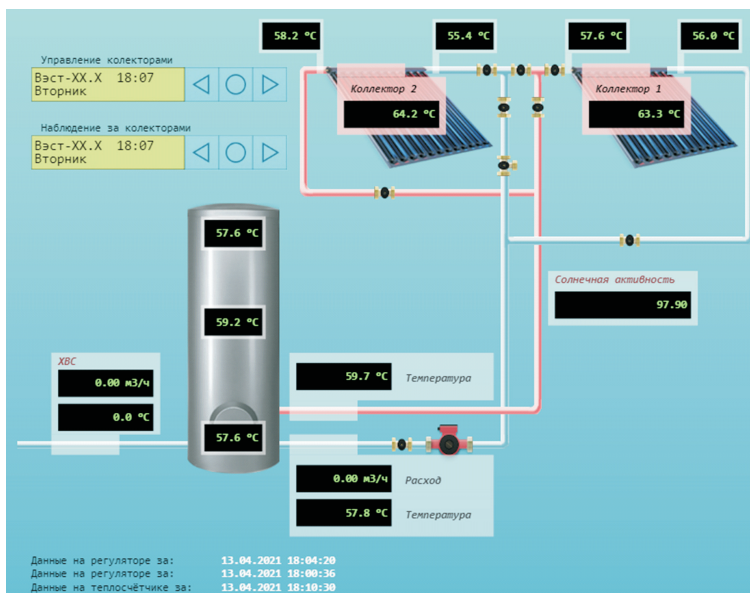


Рис. 4. Мнемосхема солнечной водонагревательной установки в с. Кафтанчиково

Fig. 4. Mnemonic diagram of the solar water heating unit in Kaftanchikovo village

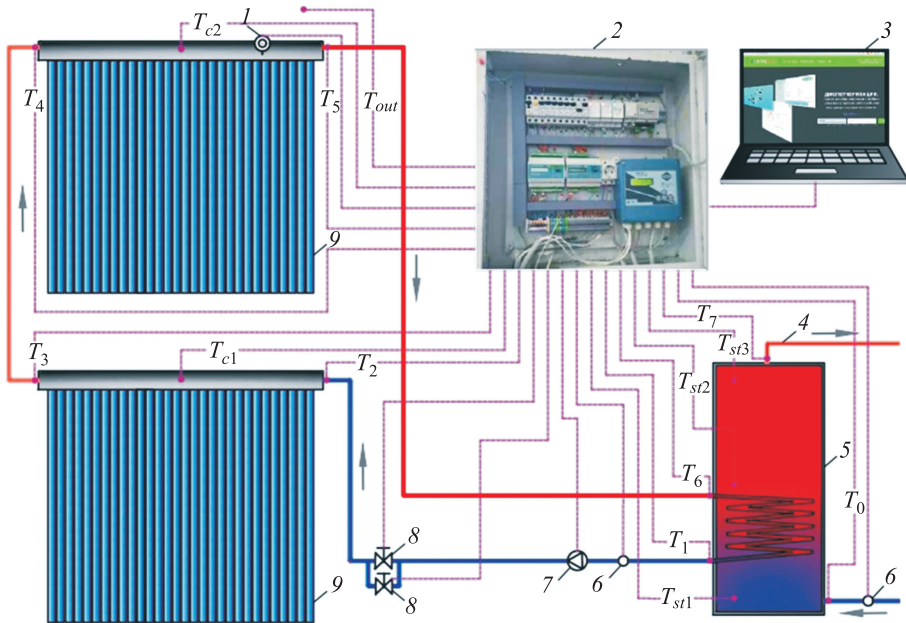


Рис. 5. Основные компоненты и используемые датчики исследуемой СВНУ
 1 – датчик солнечной инсоляции; 2 – блок управления с устройством для сбора и передачи данных; 3 – сервер; 4 – трубопровод подачи нагретой воды к потребителю; 5 – бак-аккумулятор; 6 – измеритель расхода воды; 7 – циркуляционный насос; 8 – электромагнитный клапан; 9 – коллектор

Fig. 5. Main components and sensors of the solar water heating unit under study
 1 – solar radiation sensor; 2 – control unit with data acquisition and transmission device; 3 – server; 4 – pipeline for feeding heated water to users; 5 – storage tank; 6 – water flow meter; 7 – recirculating pump; 8 – solenoid valve; 9 – collector

торов и температуры воды в бак-аккумуляторе в той же модели, но с включением данных по солнечной радиации в г. Томске сопоставлены с экспериментальными данными [33], полученными на установке в с. Кафтанчиково. Наблюдается хорошее качественное и количественное согласие расчетных и экспериментальных данных. Разработанная модель часовой инсоляции с учетом реальной облачности получила высокую оценку зарубежных ученых [33].

Целью настоящей работы является выполнение исследований особенностей режимов работы гибридной солнечной опытно-промышленной водонагревательной установки при отрицательных температурах наружного воздуха для разработки решений, обеспечивающих исключение замерзания теплоносителя в гидравлических контурах коллекторов в ночное время.

2. Материалы и методы исследования. Достижение поставленной цели осуществлялось посредством натурного экспериментального исследования режимов работы опытно-промышленной солнечной водонагревательной установки, функциональная схема которой представлена на рис. 5. Установка входит в состав гибридной солнечной системы горячего водоснабжения производственного цеха № 1 НПО ВЭСТ.

Датчиком солнечной инсоляции, закрепленным на одном из двух вакуумных коллекторов (рис. 6), измерялся падающий на коллекторы тепловой поток.



Рис. 6. Датчик инсоляции на наклонную поверхность с его закреплением на коллекторе

Fig. 6. Solar radiation sensor for inclined surface fixed on the collector

Для надежной работы экспериментальной установки предусмотрено использование программно-аппаратного комплекса, существенно облегчающего представление и обработку получаемых данных. Подобный комплекс извлекает из данных на уровне счетчиков полезную информацию для улучшения процесса управления энергопотреблением в зданиях, например, путем выявления неэффективности или аномального расхода энергии в реальном времени [34].

Разработанный и апробированный программно-аппаратный комплекс для исследования гибридных солнечных систем горячего водоснабжения на северных территориях содержит надежную гетерогенную связь с внешним доступом, обеспечен программой с возможностью управления и быстрого получения запрашиваемых данных на смартфон. Комплекс позволяет изменять временной интервал между измерениями, строить в любом диапазоне по времени графики изменения параметров работы установки и показаний других первичных сенсоров. Программно-аппаратный комплекс выдает информацию в графическом и в табличном виде, интегрирует данные в другие системы.

Производительность коллекторов зависит от их чистоты (рис. 7, 8).

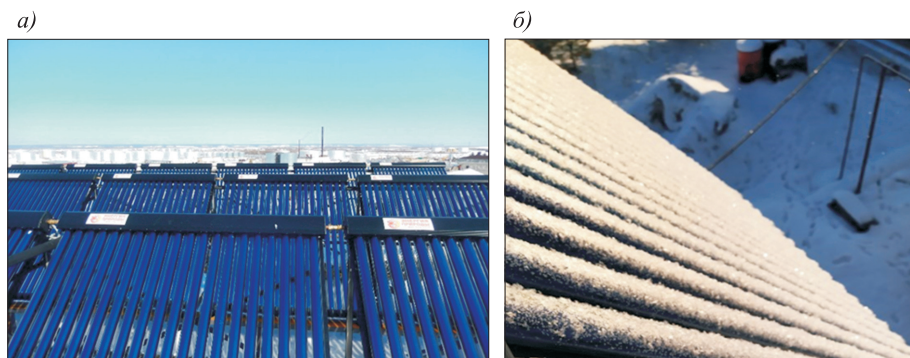


Рис. 7. Возможные состояния поверхности трубок коллекторов в зимнее время
a – чистые в г. Якутске; *б* – при сильном обледенении в с. Кафтанчиково Томской области

Fig. 7. Possible conditions of collector tubes' surface in winter
a – clear in Yakutsk; *b* – with heavy icing in Kaftanchikovo village (Tomsk region)

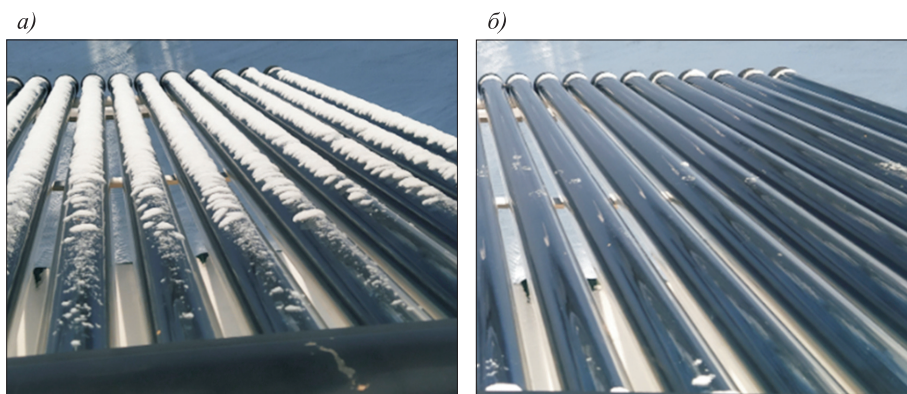


Рис. 8. Типичное состояние поверхностей трубок коллекторов после выпадения снега (а) и после чистки поверхностей коллекторов (б) в с. Кафтанчиково Томской области

Fig. 8. Typical condition of collector tubes' surface after snowing (a) and after surface cleaning (b) in Kaftanchikovo village (Tomsk region)

Далее представлены основные результаты, связанные с достижением поставленной цели исследования. Тепловая производительность загрязненных инеем или снегом коллекторов определялась с 12 до 13 ч, а очищенных коллекторов – с 13:30 до 14:30 в один и тот же день. При этом времени интегральные показания датчика инсоляции в ясную солнечную погоду (12 дней) были практически одинаковыми.

3. Результаты и обсуждение. В Якутии зона сухого климата, иней на поверхностях труб коллекторов практически не образуется, а падающий снег сдувается ветром или быстро испаряется за счет сублимации в солнечную погоду (см. рис. 7, а). Томск расположен в зоне нормального климата, поэтому на поверхности коллекторов иногда наблюдается сильное обледенение (рис. 7, б), на рис. 8 показано типичное состояние в периоды снегопада с последующей чисткой. Согласно проведенному анализу измеренных счетчиком тепловой энергии 12 значений часовой производительности коллекторов в период с 03.11.2020 по 06.04.2021 г. установлено, что снижение производительности обледеневших коллекторов (см. рис. 7, б) при одном опыте составило по сравнению с очищенными коллекторами 31,3 %, а при 11 опытах – от 16,4 до 23,1 %.

Ночью 25.01.2021 г. температура коллекторов № 1 и 2 снизилась до 37,5 °С, что привело к замерзанию теплоносителя и существенно осложнило выход системы в штатный режим работы (рис. 9). Насос не обеспечивал циркуляцию теплоносителя в циркуляционном контуре. Температура коллектора № 1 поднялась до 62,4 °С, а коллектора № 2 – до 60,1 °С. На графиках рис. 9 и последующих использовались обозначения: T_{c1} , T_{c2} – температуры теплоносителя в первом и втором коллекторах соответственно; T_{st1} – температура воды в нижней части бака; R – интенсивность солнечной радиации.

Поскольку время стояния температуры наружного воздуха ниже –30 °С незначительно, то использовать более дорогой теплоноситель с гораздо низкой температурой замерзания невыгодно экономически. Проще всего можно добиться предотвращения охлаждения теплоносителя ниже точки замерза-

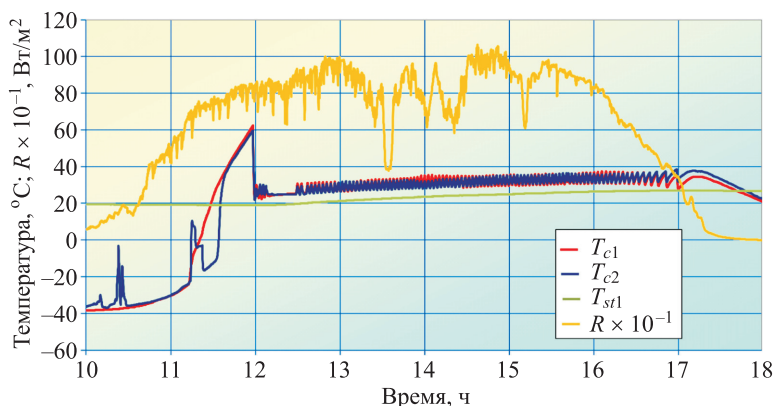


Рис. 9. Процесс выхода циркуляционного контура коллекторов на штатный режим работы после замерзания теплоносителя в ночное время

Fig. 9. The process of reaching the circulation circuit of the collectors to the normal operating mode after freezing of the fluid at night

ния средствами управления циркуляционным насосом. С этой целью были реализованы ночные и дневные уставки регулятора для управления работой циркуляционного насоса (рис. 10).

В ночные часы при достижении средней температуры коллекторов $-10,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ включается циркуляционный насос и по достижении температуры $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ коллектором № 2 циркуляционный насос выключается.

В дневные часы при достижении коллектором № 1 температуры на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше, чем температура воды в нижней части бака-аккумулятора, происходит первое и последующие включения циркуляционного насоса. Выключается он при снижении температуры коллектора № 1 до уровня на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше, чем температура воды в нижней части бака-аккумулятора.

Экспериментальные результаты реализации этого сценария управления насосом 18 и 19.02.2021 г. приведены на рис. 11, а, где на основе данных показана возможность снижения температуры коллектором № 2 и достижения значений ниже температуры уставки регулятора ($-10,1\text{ }^{\circ}\text{C}$). Температура коллектора № 1 при этом оказывается выше $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, что приводит к большим тепловым потерям из бака-аккумулятора.

Ночь	День
Управление коллекторами TOnmin <> -10,1 `C	Управление коллекторами dTON <> 10,0 `C
Управление коллекторами TOFmin <> 0,1 `C	Управление коллекторами dTOF <> 1,0 `C

Рис. 10. Ночные и дневные уставки регулятора для управления работой циркуляционного насоса

Fig. 10. Daily and nightly set points for recirculating pump operation control

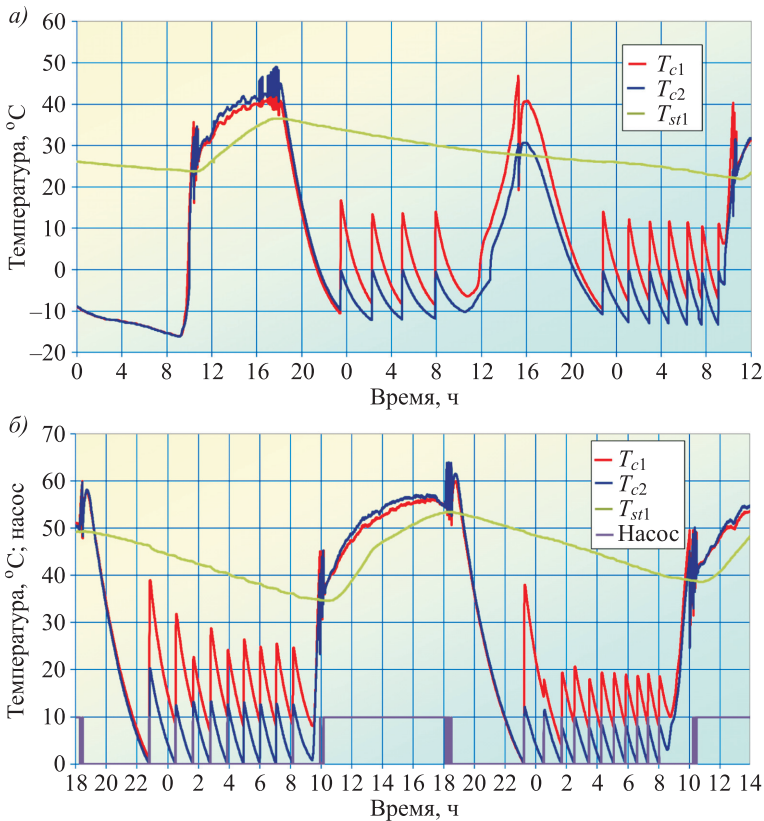


Рис. 11. Температурные режимы работы установки в ночное время при включениях циркуляционного насоса по средней температуре коллекторов (а) и по температуре коллектора № 2 (б)

Fig. 11. Temperature scenarios of the unit operation during night hours with the run of recirculating pump with respect to the collectors' average temperature (a) and to the temperature of collector no. 2 (b)

На рис. 11, б представлены экспериментальные данные по реализации сценария управления включением циркуляционного насоса по температуре коллектора № 2. График «Насос» показывает включение и выключение циркуляционного насоса: ордината 0 – насос включен, ордината 10 – выключен. Согласно представленным данным температура коллекторов № 1 и 2 не снижается ниже уставки регулятора 0 °С. Тепловые потери при этом возрастают из-за высокой температуры коллектора № 1.

Управление циркуляционным насосом в ночное время для исключения замерзания теплоносителя приводит к снижению энергоэффективности установки.

На рис. 12 видно, что при изменении температуры в нижней (T_{st1}) и средней (T_{st2}) части бака-аккумулятора их разность увеличивается с момента заката солнца и достигает максимальной величины утром при первом включении циркуляционного насоса.

При открытом соленоидном клапане и достижении некоторой разности температуры воды в нижней и средней частях бака-аккумулятора возникает естественная конвекция. Теплоноситель начинает движение через коллектор № 2 (рис. 13, 14).

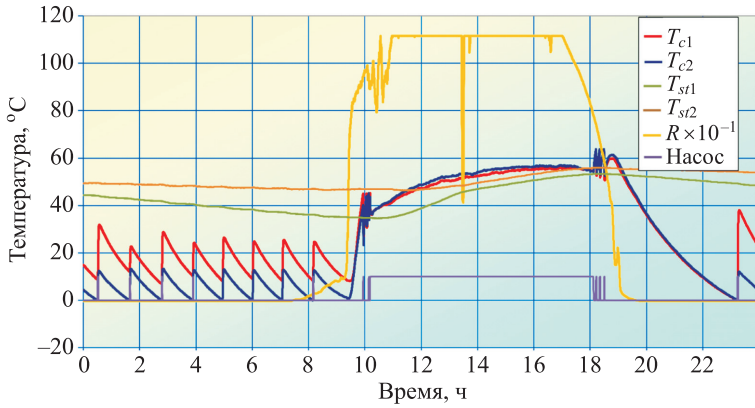


Рис. 12. К анализу динамики стратификации температуры в баке-аккумуляторе в ночное и дневное время

Fig. 12. Analysis of thermal stratification in the storage tank during night hours

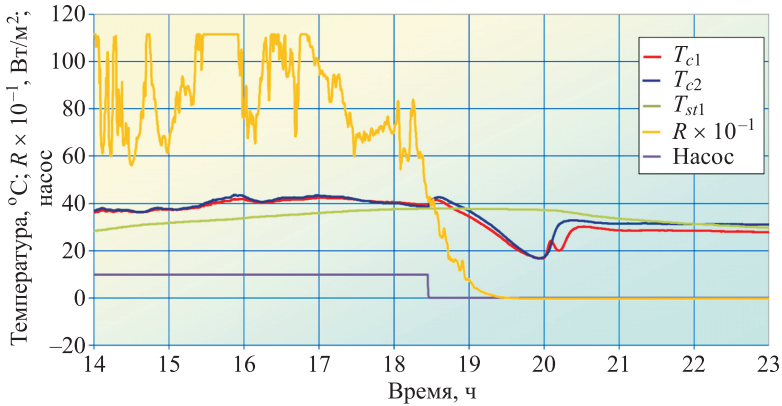


Рис. 13. Возникновение естественной конвекции в циркуляционном контуре (01.04.2021 г.)

Fig. 13. Natural convection occurrence in the circulation circuit (01.04.2021)

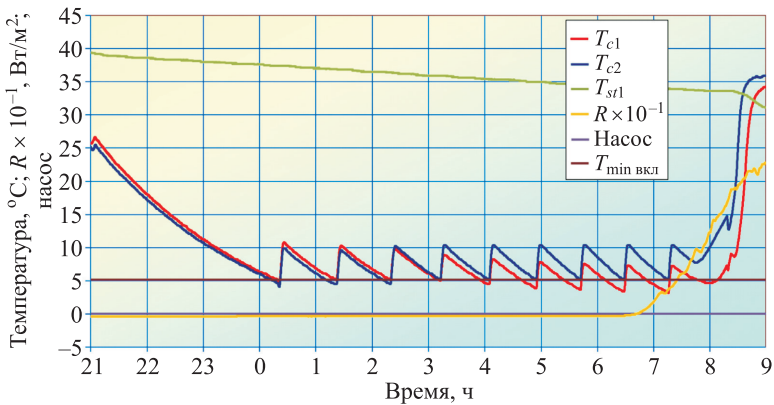


Рис. 14. Результат управления соленоидным клапаном в ночное время (04.04.2021 г.)

Fig. 14. The result of solenoid valve control during night hours (04.04.2021)

В начальный момент возникновения естественной конвекции температура коллекторов возрастает и изменяется одинаково. Этот важный момент позволил организовать выполнение сценария (нижняя уставка регулятора ($T_{\min \text{ вкл}}$) равна 5 °С, верхняя – 10 °С) управления соленоидным клапаном с целью изменения температуры коллекторов в узком диапазоне (5 °С) с минимумом тепловых потерь из бака-аккумулятора. После трех открытий и закрытий соленоидного клапана температура коллектора № 1 снижается ниже допустимого уровня. Это можно исключить одновременным включением насоса и клапана на определенное заранее время в четвертом и возможно в другом цикле.

4. Выводы. 1. Возникновение естественной конвекции является наиболее простым способом предотвращения замерзания теплоносителя в ночные часы для гелиосистем горячего водоснабжения г. Якутска с циркуляционным насосом и с установленным под коллекторами аккумулирующим баком. При этом теряется более 20 % тепловой энергии, вырабатываемой солнечными коллекторами и газовым котлом (максимальное значение тепловых потерь). Во избежание таких потерь в гидравлическом контуре был установлен управляемый контроллером электромагнитный клапан, исключающий возникновение естественной конвекции. Это создает возможность охлаждения коллекторов и части трубопровода внутренней гидросистемы до температуры окружающей среды, которая может быть ниже точки замерзания используемого теплоносителя.

2. На основе представленных экспериментальных данных можно предложить два способа, позволяющих избежать как существенных потерь тепловой энергии, так и замерзания теплоносителя:

работа рециркуляционного насоса в режиме пуск/остановка при достижении нижней или верхней уставки температуры соответственно (наблюдаются значительные потери тепловой энергии);

открытие/закрытие электромагнитного клапана при достижении нижней или верхней уставки температуры соответственно (соблюдаются минимальные тепловые потери).

Список источников

1. *Avtar R., Tripathi S., Aggarwal A.K., Kumar P.* Population–urbanization–energy nexus: a review // *Resources*. 2019. Vol. 8, no. 3. P. 136.
2. *Bompard E., Botterud A., Corgnati S., Huang T., Jafari M., Leone P., Mauro S., Montesano G., Papa C., Profumo F.* An electricity triangle for energy transition: Application to Italy // *Applied Energy*. 2020. Vol. 277. P. 115525.
3. *Peña-Ramos J.A., Bagus P., Amirov-Belova D.* The North Caucasus Region as a Blind Spot in the «European Green Deal»: Energy Supply Security and Energy Superpower Russia // *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 17.
4. *Liu J., Sun W., Yan J.* Effect of P2G on Flexibility in Integrated Power-Natural Gas-Heating Energy Systems with Gas Storage // *Energies*. 2021. Vol. 14. P. 196.
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. Vol. 14. P. 215.
6. *Tsvetkov P.* Climate Policy Imbalance in the Energy Sector: Time to Focus on the Value of CO₂ Utilization // *Energies*. 2021. Vol. 14. P. 411.

7. *Fragkos P., Fragkiadakis K., Paroussos L.* Reducing the Decarbonisation Cost Burden for EU Energy-Intensive Industries // *Energies*. 2021. Vol. 14. P. 236.
8. *Haukkala T.* Does the sun shine in the High North? Vested interests as a barrier to solar energy deployment in Finland // *Energy Research & Social Science*. 2015. No. 6. P. 50–58.
9. *Liu P., Lin B., Zhou H., Wu X., Little J.C.* CO₂ emissions from urban buildings at the city scale: System dynamic projections and potential mitigation policies // *Applied Energy*. 2020. Vol. 277. P. 115546.
10. *Wei S., Tien P.W., Calautit J.K., Wu Y., Boukhanouf R.* Vision-based detection and prediction of equipment heat gains in commercial office buildings using a deep learning method // *Applied Energy*. 2020. Vol. 277. P. 115506.
11. *Abikoye B., Čuček L., Isafiade A.J., Kravanja Z.* Synthesis of solar thermal network for domestic heat utilization // *Chemical Engineering Transactions*. 2019. No. 76. P. 1015–1020.
12. *Al-Smairan M., Shawaqfah M., AlMomani F.* Techno-Economic Investigation of an Integrated Boiler–Solar Water Heating/Cooling System: A Case Study // *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 1.
13. *Ni etić S.* Thermal management of silicon photovoltaic panels: a review // *Resource-Efficient Technologies*. 2020. Vol. 3. P. 11–36.
14. *Odhiambo M.R.O., Abbas A., Wang X., Mutinda G.* Solar Energy Potential in the Yangtze River Delta Region—A GIS-Based Assessment // *Energies*. 2021. Vol. 14. P. 143.
15. *Chopra K., Pathaka A.K., Tyagia V.V., Pandeyc A.K., Ananda S., Sari A.* Thermal performance of phase change material integrated heat pipe evacuated tube solar collector system: An experimental assessment // *Energy Conversion and Management*. 2020. Vol. 203. P. 112205.
16. Сайт Президента Российской Федерации. Указ Президента Российской Федерации от 01.12.2016 г. № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации». URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/41449>.
17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013619333. Программа обеспечения связи с GPRS модемами и TCP коммутаторами / А.И. Шилин, А.В. Малянов, Ю.О. Кривошеин. Заявка 2013614828, дата поступления 13.06.2013, дата регистрации в Реестре 02.10.2013.
18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013619668. Диспетчерский программный комплекс доставки, хранения, анализа и представления данных / А.И. Шилин, Ю.О. Кривошеин, К.И. Койков. Заявка 2013614850, дата поступления 13.06.2013, дата регистрации в Реестре 11.10.2013.
19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020660910. Операционная система для программируемого логического контроллера (ПЛК) на базе процессора STM32 / А.И. Шилин, Ю.О. Кривошеин, С.В. Прохоров, Нгуен Ван Вьонг. Заявка № 2020618110, дата поступления 30.07.2020, дата регистрации в Реестре 15.09.2020.
20. *Цветков Н.А., Кривошеин О.Ю., Кривошеин Ю.О.* Технология управления параметрами работы инженерных систем строительных объектов с удаленным доступом (на примере ТГАСУ) // *Вестн. Том. гос. архит.-строит. ун-та*. 2013. № 2. С. 326–336.
21. *Кривошеин Ю.О., Кривошеин О.Ю., Цветков Н.А.* Система диспетчерского контроля и управления потреблением энергоресурсов объектами с функцией удаленного доступа // XIX Междунар. конф. студентов и мол. ученых «Современные техника и технологии» СТТ-2013, Томск, 12–16 апреля 2013 г.: сб. материалов. Томск: Изд-во Национ. исслед. Том. политехн. ун-та, 2013. С. 231–232.

22. *Кривошеин Ю.О., Саврасов Ф.В., Цветков Н.А.* Разработка и реализация системы горячего теплоснабжения с использованием солнечной энергии // Материалы I Междунар. конф. студентов и мол. ученых «Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы», Томск, 11–12 ноября 2014 г. Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2014. С. 152–153.
23. *Цветков Н.А., Кривошеин Ю.О., Хуторной А.Н., Колесникова А.В., Саврасов Ф.В.* Автоматизированная гетерогенная система диспетчеризации и управления потреблением энергоресурсов // Вестн. Том. гос. архит.-строит. ун-та. 2015. № 5. С. 138–150.
24. *Кривошеин Ю.О., Хуторной А.Н., Цветков Н.А.* Гетерогенная IT-система диспетчеризации – как основа контроля, учета, мониторинга и управления энергоресурсопотреблением в многоквартирных жилых домах // Актуальные проблемы современности: Междунар. науч. журн. 2016. № 2(12). С. 173–179.
25. *Кривошеин Ю.О., Рихтер И.В., Цветков Н.А.* Потребление энергоресурсов автоматизированными объектами Томского государственного архитектурно-строительного университета (ТГАСУ) // Избр. докл. 63-й Университетской науч.-техн. конф. студентов и молодых ученых. Томск: Изд-во ТГАСУ, 2017. С. 761–765.
26. *Корчигина Е.А., Кривошеин Ю.О., Цветков Н.А.* Программно-аппаратный комплекс системы диспетчеризации и управления потреблением энергоресурсов НПО ВЭСТ // Избр. докл. 63-й Университетской науч.-техн. конф. студентов и молодых ученых. Томск: Изд-во ТГАСУ, 2017. С. 750–756.
27. *Krivoshein Yu.O., Tolstykh A.V., Tsvetkov N.A., Khutornoy A.N.* Efficiency of dual hot water systems with the use of solar evacuated tube collectors in the Northern territories // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 408. P. 012011.
28. *Tsvetkov N.A., Krivoshein Yu.O., Khutornoy 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. Vol. 81. P. 943–948.
29. *Кривошеин Ю.О., Цветков Н.А., Толстых А.В., Хуторной А.Н., Колесникова А.В., Петрова А.В.* Эффективная солнечная система горячего водоснабжения для северных территорий // Вестн. Том. гос. архит.-строит. ун-та. 2020. Т. 22, № 6. С. 119–131.
30. *Цветков Н.А., Кривошеин Ю.О., Толстых А.В., Хуторной А.Н.* Моделирование инсоляции на горизонтальную поверхность для расчета почасовых значений солнечной радиации // Изв. вузов. Строительство. 2019. № 6(726). С. 81–92.
31. *Krivoshein Yu.O., Tolstykh A.V., Tsvetkov N.A., Khutornoy A.N.* Mathematical model for calculating solar radiation on horizontal and inclined surfaces for the conditions of Yakutsk // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 408. P. 012002.
32. *Tsvetkov N.A., Krivoshein Yu.O., Tolstykh A.V., Khutornoy 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. Vol. 210. P. 118577.
33. *Enriquez-Velásquez E.A., Benitez V.H., Obukhov S.G., Félix-Herrán L.C., Lozoya-Santos J.* Estimation of Solar Resource Based on Meteorological and Geographical Data: Sonora State in Northwestern Territory of Mexico as Case Study // Energies. 2020. Vol. 13. P. 6501.
34. *Chiosa R., Piscitelli M.S., Capozzoli A.A.* Data Analytics-Based Energy Information System (EIS) Tool to Perform Meter-Level Anomaly Detection and Diagnosis in Buildings // Energies. 2021. Vol. 14. P. 237.

References

1. Avtar R., Tripathi S., Aggarwal A.K., Kumar P. Population–urbanization–energy nexus: a review. *Resources*. 2019; 8(3): 136.
2. Bompard E., Botterud A., Corgnati S., Huang T., Jafari M., Leone P., Mauro S., Montesano G., Papa C., Profumo F. An electricity triangle for energy transition: Application to Italy. *Applied Energy*. 2020; 277: 115525.
3. Peña-Ramos J.A., Bagus P., Amirov-Belova D. The North Caucasus Region as a Blind Spot in the “European Green Deal”: Energy Supply Security and Energy Superpower Russia. *Energies*. 2021; 14(17).
4. Liu J., Sun W., Yan J. Effect of P2G on Flexibility in Integrated Power-Natural Gas-Heating Energy Systems with Gas Storage. *Energies*. 2021; 14: 196.
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: 215.
6. Tsvetkov P. Climate Policy Imbalance in the Energy Sector: Time to Focus on the Value of CO₂ Utilization. *Energies*. 2021; 14: 411.
7. Fragkos P., Fragkiadakis K., Paroussos L. Reducing the Decarbonisation Cost Burden for EU Energy-Intensive Industries. *Energies*. 2021; 14: 236.
8. Haukkala T. Does the sun shine in the High North? Vested interests as a barrier to solar energy deployment in Finland. *Energy Research & Social Science*. 2015; (6): 50–58.
9. Liu P., Lin B., Zhou H., Wu X., Little J.C. CO₂ emissions from urban buildings at the city scale: System dynamic projections and potential mitigation policies. *Applied Energy*. 2020; 277: 115546.
10. Wei S., Tien P.W., Calautit J.K., Wu Y., Boukhanouf R. Vision-based detection and prediction of equipment heat gains in commercial office buildings using a deep learning method. *Applied Energy*. 2020; 277: 115506.
11. Abikoye B., Čuček L., Isafiade A.J., Kravanja Z. Synthesis of solar thermal network for domestic heat utilization. *Chemical Engineering Transactions*. 2019; (76): 1015–1020.
12. Al-Smairan M., Shawaqfah M., AlMomani F. Techno-Economic Investigation of an Integrated Boiler–Solar Water Heating/Cooling System: A Case Study. *Energies*. 2021; 14(1).
13. Ni etić S. Thermal management of silicon photovoltaic panels: a review. *Resource-Efficient Technologies*. 2020; 3: 11–36.
14. Odhiambo M.R.O., Abbas A., Wang X., Mutinda G. Solar Energy Potential in the Yangtze River Delta Region—A GIS-Based Assessment. *Energies*. 2021; 14: 143.
15. Chopra K., Pathaka A.K., Tyagia V.V., Pandeyc A.K., Ananda S., Sari A. Thermal performance of phase change material integrated heat pipe evacuated tube solar collector system: An experimental assessment. *Energy Conversion and Management*. 2020; 203: 112205.
16. Website of the President of the Russian Federation 2016 Presidential Decree of the Russian Federation of December 1, 2016 No. 642 “About the strategy of scientific technology development of the Russian Federation”. (In Russ.). URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/41449>.
17. Certificate of state registration of a computer software No. 2013619333. Software for connection of GPRS modems with TCP communicators. A.I. Shilin, A.V. Malyanov, Yu.O. Krivoshein. Application No. 2013614828, accepted on June 13, 2013, registered on October 2, 2013. (In Russ.).
18. Certificate of state registration of a computer software No. 2013619668. Dispatch software for data delivery, storage and analysis. A.I. Shilin, Yu.O. Krivoshein, K.I. Koykov. Application No. 2013614850, accepted on June 13, 2013, registered on October 11, 2013. (In Russ.).

19. Certificate of state registration of a computer software No. 2020660910. Operating system for a programmable logic controller (PLC) based on an STM32 processor. A.I. Shilin, Yu.O. Krivoshein, S.V. Prokhorov, Van Vuong N. Application No. 2020618110, accepted on July 30, 2020, registered on September 15, 2020. (In Russ.).
20. *Tsvetkov N.A., Krivoshein O.Yu., Krivoshein Yu.O.* Remote access technology for parameters control of engineering systems in construction objects (TSUAB example). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta = Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013; (2): 326–336. (In Russ.).
21. *Krivoshein Yu.O., Krivoshein O.Yu., Tsvetkov N.A.* Remote access dispatch control system for energy consumption in buildings Proceedings. XIX International conference of students and young researchers “Modern technologies and equipment”. Tomsk: Publishing house of National Research Tomsk Polytechnic University, 2013. P. 231–232. (In Russ.).
22. *Krivoshein Yu.O., Savrasov F.V., Tsvetkov N.A.* Design and implementation of solar heating system Proceedings. I International conference of students and young researchers “Youth, science and technology: New ideas and prospects”. Tomsk: Publishing house of Tomsk State University of Architecture and Building, 2014. P. 152–153. (In Russ.).
23. *Tsvetkov N.A., Krivoshein Yu.O., Khutornoy A.N., Kolesnikova A.V., Savrasov F.V.* Automated heterogeneous system for dispatching and control of energy consumption. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta = Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015; (5): 138–150. (In Russ.).
24. *Krivoshein Yu.O., Khutornoy A.N., Tsvetkov N.A.* Heterogeneous dispatch IT-system as a basis for control, account and monitoring of energy consumption in apartment buildings. *Aktual'nyye problemy sovremennosti: Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal = Actual problems of the present: International scientific journal*. 2016; (2(12)): 173–179. (In Russ.).
25. *Krivoshein Yu.O., Rikhter I.V., Tsvetkov N.A.* Energy consumption of automated objects of Tomsk State University of Architecture and Building Proceedings. 63rd University Scientific and Technical Conference of Students and Young Researchers. Tomsk: Publishing house of Tomsk State University of Architecture and Building, 2017. P. 761–765. (In Russ.).
26. *Korchigina E.A., Krivoshein Yu.O., Tsvetkov N.A.* Software and hardware complex of the dispatching and energy consumption management system of NPO VEST. Selected reports on the 63rd University Scientific and Technical Conference of Students and Young Scientists. Tomsk: Publishing house of Tomsk State University of Architecture and Building, 2017. P. 750–756. (In Russ.).
27. *Krivoshein Yu.O., Tolstykh A.V., Tsvetkov N.A., Khutornoy A.N.* Efficiency of dual hot water systems with the use of solar evacuated tube collectors in the Northern territories. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 408: 012011.
28. *Tsvetkov N.A., Krivoshein Yu.O., Khutornoy A.N., Boldryev 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.
29. *Krivoshein Yu.O., Tsvetkov N.A., Tolstykh A.V., Khutornoy A.N., Kolesnikova A.V., Petrova A.V.* Effective solar hot water system for northern territories. *Vestnik of Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta = Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2020; 22(6): 119–131. (In Russ.).

30. Tsvetkov N.A., Krivoshein Yu.O., Tolstykh A.V., Khutornoy A.N. Modeling of insolation on a horizontal surface for calculation of hourly solar radiation. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo = News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2019; (6(726)): 81–92. (In Russ.).
31. Krivoshein Yu.O., Tolstykh A.V., Tsvetkov N.A., Khutornoy A.N. Mathematical model for calculating solar radiation on horizontal and inclined surfaces for the conditions of Yakutsk. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 408. P. 012002.
32. Tsvetkov N.A., Krivoshein Yu.O., Tolstykh A.V., Khutornoy 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; 210: 118577.
33. Enríquez-Velásquez E.A., Benitez V.H., Obukhov S.G., Félix-Herrán L.C., Lozoya-Santos J. Estimation of Solar Resource Based on Meteorological and Geographical Data: Sonora State in Northwestern Territory of Mexico as Case Study. *Energies*. 2020; 13: 6501.
34. Chiosa R., Piscitelli M.S., Capozzoli A.A. Data Analytics-Based Energy Information System (EIS) Tool to Perform Meter-Level Anomaly Detection and Diagnosis in Buildings. *Energies*. 2021; 14: 237.

Информация об авторах

Н.А. Цветков – доктор технических наук, профессор, nac.tsuab@yandex.ru

Ю.О. Кривошеин – старший преподаватель, krivoshein@npowest.ru

А.В. Толстых – кандидат физико-математических наук, доцент, tolstbu@yandex.ru

Ю.Н. Дорошенко – кандидат технических наук, доцент, kafotopventl@rambler.ru

Information about the authors

N.A. Tsvetkov – DSc, Professor, nac.tsuab@yandex.ru

Yu.O. Krivoshein – Senior Lecturer, krivoshein@npowest.ru

A.V. Tolstykh – PhD, Ass. Professor, tolstbu@yandex.ru

Yu.N. Doroshenko – PhD, Ass. Professor, kafotopventl@rambler.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 22.03.2022
Одобрена после рецензирования 22.04.2022
Принята к публикации 29.04.2022

The article was submitted 22.03.2022
Approved after reviewing 22.04.2022
Accepted for publication 29.04.2022