

# ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

УДК 697.34:621.397:69

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-6-119-131

*Ю.О. КРИВОШЕИН, Н.А. ЦВЕТКОВ, А.В. ТОЛСТЫХ,  
А.Н. ХУТОРНОЙ, А.В. КОЛЕСНИКОВА, А.В. ПЕТРОВА,  
Томский государственный архитектурно-строительный университет*

## **ЭФФЕКТИВНАЯ СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ СЕВЕРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ**

Целью настоящей работы является разработка эффективной солнечной системы горячего водоснабжения, в которой исключаются тепловые потери накопленной тепловой энергии в баке-аккумуляторе за счет естественной конвекции теплоносителя в гидравлическом контуре коллекторов.

Проведено натурное экспериментальное исследование негативного эффекта естественной конвекции в ночное время в опытно-промышленной гибридной солнечной системе горячего водоснабжения с использованием разработанного программно-аппаратного комплекса с внешним доступом.

Для северных территорий разработана, построена и испытана опытно-промышленная гибридная солнечная система с усовершенствованным гидравлическим контуром и программно-аппаратным комплексом диспетчеризации и управления потреблением энергоресурсов с удаленным доступом.

Оснащение гидравлического контура коллекторов управляемым контроллером устройством отключения и включения движения теплоносителя позволяет для условий северных территорий повысить эффективность хранения накопленной тепловой энергии в баках-аккумуляторах и повысить солнечную фракцию систем горячего водоснабжения, снизить расходы топлива в дополнительных источниках системы и уменьшить выбросы вредных веществ от его сжигания.

Установлено, что использование соленоидного клапана для исключения возникновения естественной конвекции позволяет повысить эффективность хранения накопленной тепловой энергии в баках-аккумуляторах не менее чем на 50 % и повысить солнечную фракцию систем не менее чем на 25 %.

**Ключевые слова:** солнечные коллекторы; эффективность солнечных систем горячего водоснабжения; экспериментальные исследования; программно-аппаратный комплекс с удаленным доступом.

**Для цитирования:** 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 // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 6. С. 119–131.  
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-6-119-131

© Кривошеин Ю.О., Цветков Н.А., Толстых А.В., Хуторной А.Н., Колесникова А.В., Петрова А.В., 2020

*Yu.O. KRIVOSHEIN, N.A. TSVETKOV, A.V. TOLSTYKH,  
A.N. KHUTORNOY, A.V. KOLESNIKOVA, A.V. PETROVA,  
Tomsk State University of Architecture and Building*

## **EFFECTIVE SOLAR HOT WATER SYSTEM FOR NORTHERN TERRITORIES**

**Purpose.** The aim of this work is to develop an effective solar hot water system, which eliminates the heat loss of the accumulated thermal energy in the storage tank due to the natural convection of the coolant in the hydraulic circuit of collectors. **Design technique.** A full-scale experimental study concerns the negative effect of natural convection at night in the experimental industrial hybrid solar hot water system in the developed hard and software with remote access. **Results.** The pilot industrial hybrid solar system with the improved hydraulic circuit and a soft and hardware system for dispatching and managing energy consumption with remote access was developed, built and tested for Northern territories. **Practical implications.** The hydraulic circuit of collectors equipped with a controller for switching off the coolant provides the northern conditions to increase the thermal energy in storage tanks and the solar fraction of hot water systems, reduce the fuel consumption in additional system sources and the emission of harmful substances produced by the fuel combustion. **Originality/value.** It is shown that the use of a solenoid valve to eliminate the natural convection increases the thermal energy storage in tanks by at least 50 % and the solar fraction of systems by at least 20 %.

**Keywords:** solar collectors; solar hot water supply systems; experimental research; software and hardware with remote access.

**For citation:** Krivoshein Yu.O., Tsvetkov N.A., Tolstykh A.V., Khutornoy A.N., Kolesnikova A.V., Petrova A.V. Effektivnaya solnechnaya sistema goryachego vodosnabzheniya dlya severnykh territorii [Effective solar hot water system for northern territories]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 6. Pp. 119–131.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-6-119-131

### **Введение**

Стремительное увеличение населения Земли и рост мировой экономики существенно повышают мировой спрос на энергию [1, 2]. Исследован спрос на использование тепловой энергии в жилом секторе для 165 стран, и построены глобальные карты [3]. Строительный сектор [4] занимает значительную долю в мировом потреблении энергии (32 %) и является одним из крупнейших факторов, способствующих изменению климата и выбросам CO<sub>2</sub>. В этой связи усиливается актуальность развития технологий минимизации использования энергии и воды, уменьшения вредных отходов и выбросов [5].

В среднем по России [6] конечное потребление тепловой энергии в жилищном секторе (2014 г.) составляло 42 %, 16 % составляло конечное потребление электроэнергии и почти треть суммарного потребления природного газа. Около 65 % территории России занимает вечная мерзлота. На северных территориях, включая и территории с вечной мерзлотой, эти показатели, несомненно, выше, и особенно по использованию относительно легко транспортируемого природного газа от близких мест добычи. Автор [6] показывает, что меры по энергосбережению, в том числе экономии природного газа на единицу вложений, дают в 3–5 раз больший эффект, чем наращивание произ-

водства газа. Поэтому стимулирование строительства энергоэффективных жилых зданий является фактором экономического роста и повышения экспортных возможностей природного газа России.

Северные территории богаты природными ресурсами и являются малонаселенными. Освоение этих территорий требует привлечения людских ресурсов, что неизбежно связано с развитием строительства энергоэффективного благоустроенного жилья с использованием возобновляемых источников энергии [7], которые позволяют сокращать потребление газа и уменьшать вредные выбросы в чувствительную к загрязнениям природу северных территорий [8, 9].

В 2013–2017 гг. в Якутске построен энергоэффективный квартал, многоквартирные жилые дома которого оснащены гибридными солнечными системами горячего водоснабжения (ГВС) [10–11]. При строительстве этих систем использованы вакуумные трубчатые коллекторы, эффективность которых показана в работе [12]. Детальные исследования эффективности этих систем [13–14] показали, что в системах, оснащенных газовыми котлами, происходит значительный перерасход природного газа на компенсацию тепловых потерь в контурах коллекторов в ночное время. Это происходило за счет возникновения естественной конвекции.

При возникновении естественной конвекции часть накопленной тепловой энергии от солнца в дневное время будет рассеиваться ночью от наружных трубопроводов и коллекторов в случаях, когда температура в баке-аккумуляторе будет выше температуры наружного воздуха. В летнее время этот эффект будет в меньшей степени снижать эффективность солнечных систем горячего водоснабжения, чем в зимних условиях. При круглогодичной эксплуатации системы на северных территориях этот эффект непроизводительных тепловых потерь будет значительно выше, чем на южных территориях.

Целью настоящей работы является разработка эффективной солнечной системы горячего водоснабжения, в которой исключаются тепловые потери накопленной тепловой энергии в баке-аккумуляторе за счет естественной конвекции теплоносителя в гидравлическом контуре коллекторов.

### Методы и подходы

Достижение поставленной цели исследований, с одной стороны, связано с разработкой, проектированием и строительством опытно-промышленной гибридной солнечной системы горячего водоснабжения (ГССГВС) в цехе № 1 научно-производственного объединения «Внедрение энергосберегающих технологий» (НПО «ВЭСТ»). С другой стороны, потребовалась разработка трехуровневого программно-аппаратного комплекса с внешним доступом для сбора, хранения, передачи, обработки и представления непрерывных (через 30 с) данных показаний сенсоров и приборов в ходе натурного экспериментального испытания системы.

Разработанная гибридная система ГВС представлена на рис. 1.

На фронте здания (рис. 1, а) выполнен монтаж двух вакуумных трубчатых коллекторов SOLTEK-DV SUNRAIN СЕРИИ TZ(ES) с площадью абсорбера 3,98 м<sup>2</sup> (производство КНР). Коллекторы обращены на юг и установ-

лены под углом наклона  $47^\circ$ . Они могут быть подключены параллельно и последовательно. Внутренние трубопроводы с показывающими контрольными приборами, циркуляционным насосом, сенсорами и запорно-регулирующей арматурой показаны на рис. 1, б. Щит управления, включающий контроллеры, счетчики расходов воды, счетчик тепловой энергии и устройство сбора и передачи данных, представлен на рис. 1, в. Бак-аккумулятор BUDERUS LOGALUX PNR 1000-80/5 E7736501725 (ФРГ) имеет объем 1000 л (рис. 1, г).

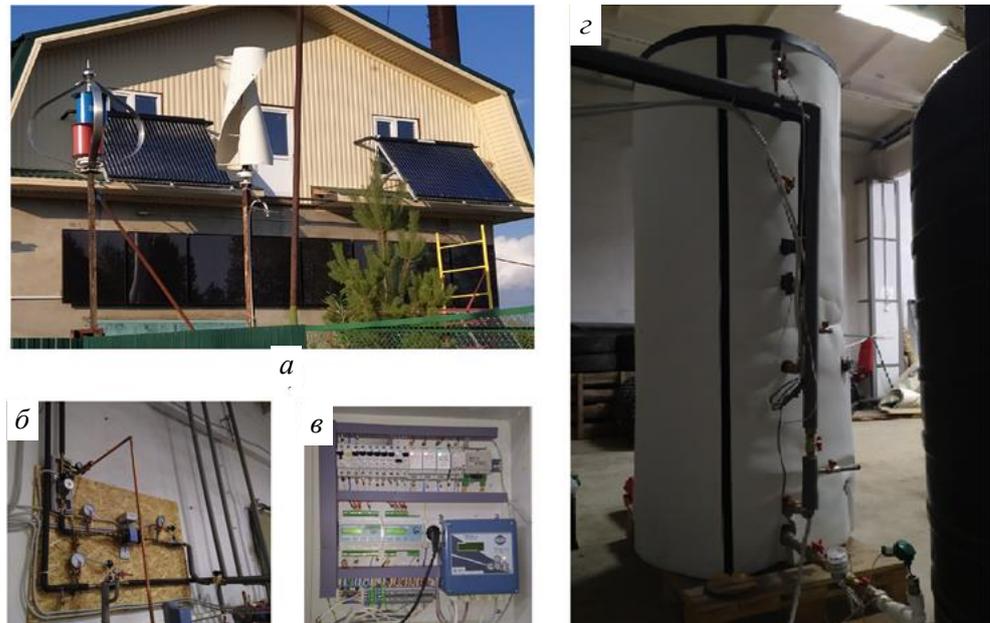


Рис. 1. Наружные и внутренние части гибридной солнечной системы ГВС:  
 а – расположение двух коллекторов, солнечных панелей и двух ветрогенераторов; б – внутренние трубопроводы; в – блок управления, сбора и передачи данных измерений; г – бак-аккумулятор

Принципиальная схема солнечной водонагревательной установки (СВНУ) опытно-промышленной установки ГССГВС представлена на рис. 2.

Отличительной особенностью исследуемой СВНУ является наличие управляемого контроллером электромагнитного (соленоидного) клапана в гидравлическом контуре коллекторов, обеспечивающего исключение возникновения естественной конвекции в ночное время. При выполнении экспериментов клапан закрывался и открывался в ручном режиме управления.

Натурные экспериментальные исследования выполнялись при использовании разработанного программно-аппаратного комплекса, который позволяет контролировать основные параметры работы системы и солнечную инсоляцию в реальном режиме времени с контролем на мнемосхеме (рис. 3). Все измерения выполнялись через 30 с. Комплекс позволял по выбору исследователя получать средние показания сенсоров и приборов через любой промежуток времени в минутах, представлять эти данные в требуемом табличном или графическом виде.

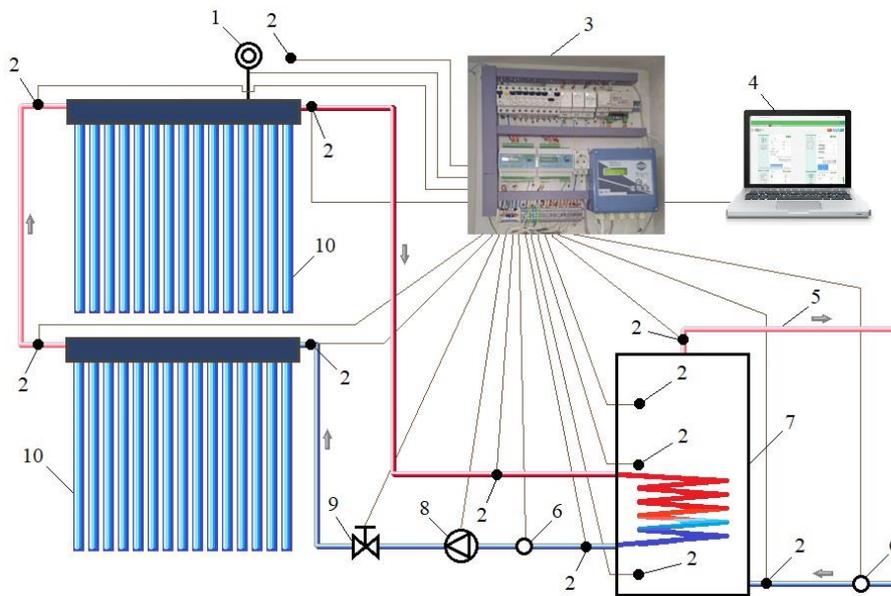


Рис. 2. Основные компоненты и используемые датчики исследуемой СВНУ:  
 1 – датчик солнечной инсоляции; 2 – датчики температуры; 3 – блок управления с устройством для сбора и передача данных; 4 – сервер; 5 – трубопровод подачи нагретой воды к потребителю; 6 – расходомер холодной воды; 7 – бак-аккумулятор; 8 – циркуляционный насос; 9 – электромагнитный клапан; 10 – коллектор

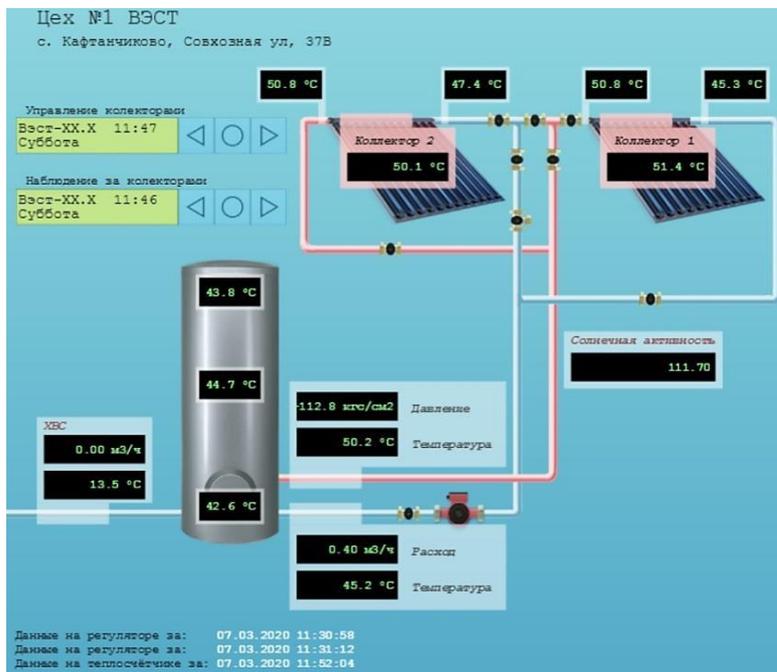


Рис. 3. Мнемосхема СВНУ для контроля основных параметров в реальном режиме местного времени

При экспериментальном годовом анализе производительности солнечной системы нагрева воды с трубчатым вакуумированным коллектором [15] использована разработанная автоматизированная подсистема для контроля параметров водонагревательной установки. В этой работе показана необходимость управления циркуляционным насосом в облачные дни. Циркуляционный насос (рис. 2) отключается при достижении разности осредненной температуры коллекторов и температуры воды в соответствующем баке-аккумуляторе менее  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  и включается, когда эта разность больше  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Нагревание воды в баке-аккумуляторе солнечными коллекторами началось утром. После восхода солнца и достижения средней температуры первого коллектора  $t_{\text{Кол1}}$  выше на  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , чем температура в нижней части бака-аккумулятора  $t_{\text{Бак1}}$ , соленоидный клапан открывался (если был закрыт) и включался циркуляционный насос. В работе [15] показано, что эффективное управление режимом работы циркуляционного насоса может увеличить производительность коллекторов в пасмурные дни. Поэтому в течение всего дня насос периодически включался и выключался при указанном условии. Вечером, после заката солнца, температура коллектора  $t_{\text{Кол1}}$  снижалась и при температуре на  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  выше температуры воды в баке  $t_{\text{Бак1}}$  соленоидный клапан (при необходимости) закрывался. В ночное время с открытым (или закрытым) соленоидным клапаном исследовался процесс охлаждения воды в баке-аккумуляторе. При этом измерялась температура воды в баке-аккумуляторе и температура теплоносителя в коллекторах.

### Результаты

Типичный процесс нагревания воды в баке-аккумуляторе, изменение солнечной активности в пасмурный день с прояснениями и температуры в коллекторах показан на рис. 4. Этот рисунок генерирован разработанным программно-аппаратным комплексом. В левой части рис. 4 видно, что часть солнечной энергии расходуется утром на нагревание коллектора. После открытия клапана и включения насоса тепловая энергия поступает в СВНУ.

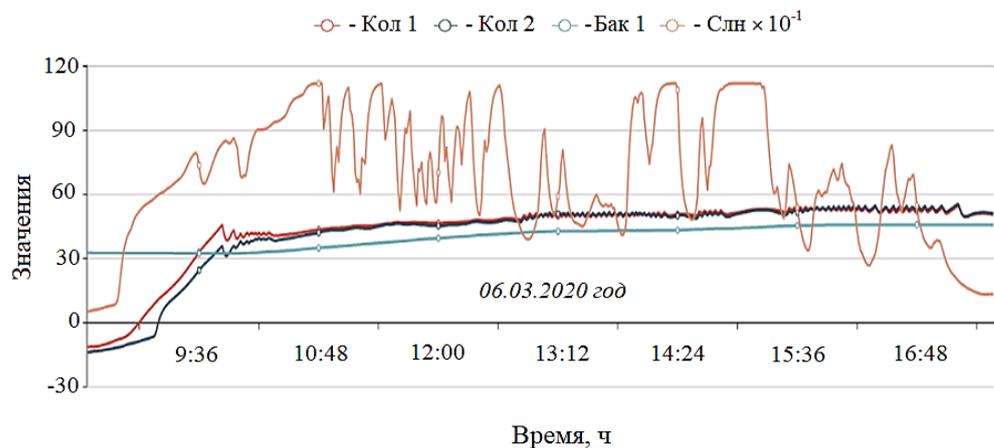


Рис. 4. Дневное нагревание воды в баке-аккумуляторе при облачной погоде

Изменение параметров СВНУ в ночное время при открытом и закрытом клапане в июне 2019 г. показано на рис. 5 и 6 соответственно.

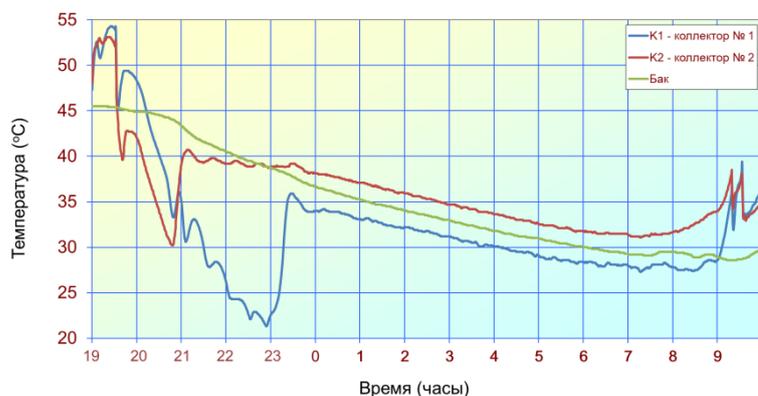


Рис. 5. Изменение параметров СВНУ при открытом клапане в ночное время с 20.06.19 г. на 21.06.19 г.

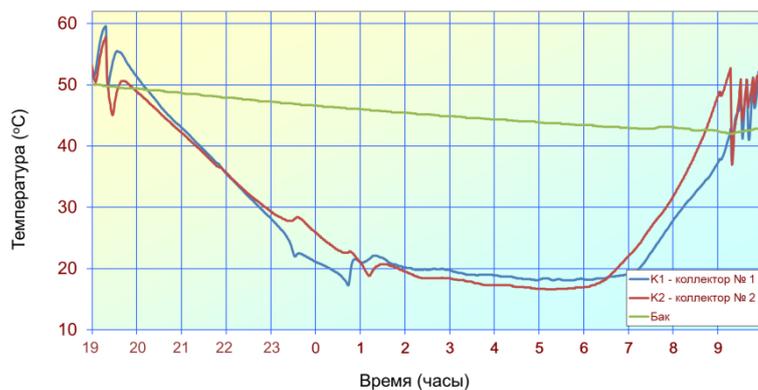


Рис. 6. Изменение параметров СВНУ при закрытом клапане в ночное время с 21.06.19 г. на 22.06.19 г.

Результаты изменения параметров СВНУ при поступлении тепловой энергии от коллекторов днем и при охлаждении воды в баке-аккумуляторе с закрытым и открытым клапаном ночью представлены на рис. 7–9.

Анализ рис. 5 и 7 показывает, что в процессе охлаждения коллекторов после выключения циркуляционного насоса при открытом клапане возникает естественная конвекция в контуре коллекторов в направлении от второго коллектора к первому. Это объясняет факт, что график изменения температуры коллектора № 2 расположен выше графика изменения температуры воды в баке-аккумуляторе, а график изменения температуры коллектора № 1 расположен ниже графика изменения температуры воды в баке-аккумуляторе. При этом тепловая энергия просто выбрасывается.

Эффект сохранения накопленной солнечной энергии при использовании соленоидного клапана в июне и в ноябре показан в табл. 1 и 2.

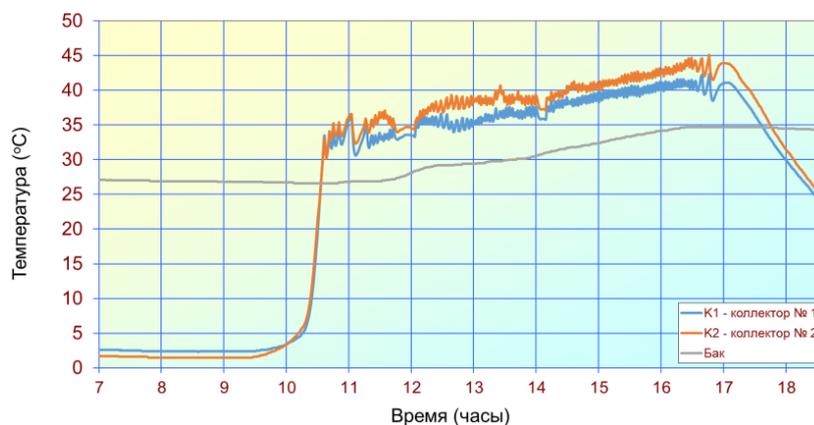


Рис. 7. Нагревание воды в баке-аккумуляторе 02.11.2019 г.

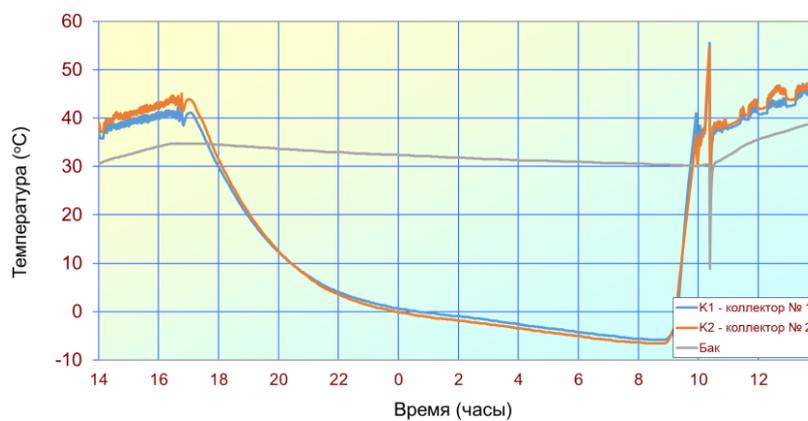


Рис. 8. Изменение параметров СВНУ при закрытом клапане с 14 ч 2 ноября по 14 ч 3 ноября 2019 г.

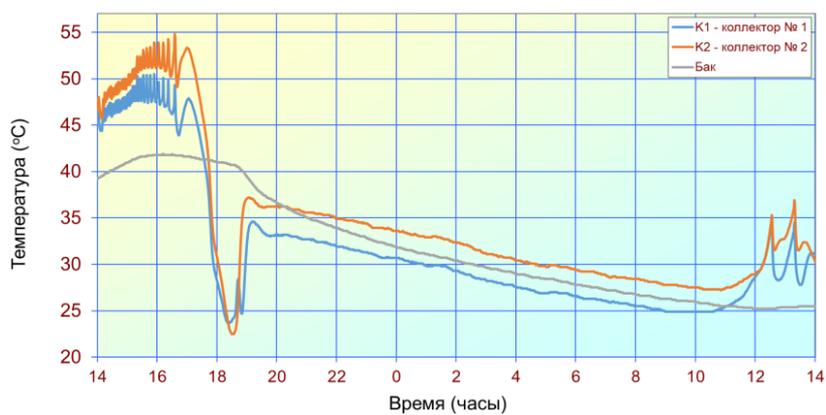


Рис. 9. Изменение параметров СВНУ при открытом клапане с 14 ч 3 ноября по 14 ч 4 ноября 2019 г.

Таблица 1

**Эффективность сохранения накопленной солнечной энергии при использовании соленоидного клапана в июне (20.06.2019–22.06.2019)**

$t_{\text{нач}},$ °С	$t_{\text{кон}},$ °С	$I_1,$ МДж	$I_2,$ МДж	$I_1-I_2,$ МДж	$Q_{\text{бак}} + Q_{\text{колл}},$ МДж	$Q_{\text{колл}},$ МДж
Электромагнитный (соленоидный) клапан открыт						
45,0	28,5	169,29	107,22	62,07	62,07	35,74
Электромагнитный (соленоидный) клапан закрыт						
50,0	43,0	188,10	161,77	26,33	26,33	–

Таблица 2

**Эффективность сохранения накопленной солнечной энергии при использовании соленоидного клапана в ноябре (02.11.2019–04.11.2019)**

$T_{\text{бак1}},$ °С	$T_{\text{бак2}},$ °С	$I_1,$ МДж	$I_2,$ МДж	$I_1-I_2,$ МДж	$Q_{\text{бак}} + Q_{\text{колл}},$ МДж	$Q_{\text{колл}},$ МДж
Электромагнитный (соленоидный) клапан открыт						
41,0	25,0	154,24	94,05	60,19	60,19	41,38
Электромагнитный (соленоидный) клапан закрыт						
35,1	30,1	132,05	113,24	18,81	18,81	–

В табл. 1, 2 обозначено:  $t_{\text{нач}}, t_{\text{кон}}$  – температура воды в баке в начале и в конце охлаждения;  $I_1, I_2$  – энтальпия воды в баке в начале и в конце охлаждения;  $Q_{\text{бак}}$  – потери тепловой энергии с поверхности бака;  $Q_{\text{колл}}$  – минимальные потери тепловой энергии воды из бака в гидравлическом контуре коллекторов при открытом клапане. Эти потери составляют в ночное время в июне 2019 г. 35,74 МДж, что в 1,36 раза выше, чем от бака-аккумулятора. В более холодную ночь (ноябрь 2019 г.) эти потери возросли до 41,38 МДж, что в 2,2 раза выше, чем от поверхности бака-аккумулятора.

Дальнейшее развитие исследований по созданию гибридных солнечных систем горячего водоснабжения на северных территориях будет связано с использованием уточненных математических моделей солнечной инсоляции на конкретной территории, как показано в работах [16–18], и усовершенствованием программно-аппаратных комплексов для управления работой элементов системы, мониторинга эффективности системы на основе технологий удаленного доступа [19].

Таким образом, применение соленоидного клапана в СВНУ для северных территорий исключает потерю около 50 % накопленной от солнца тепловой энергии в окружающую среду, обеспечивая и снижение выбросов продуктов сжигания топлива для компенсации этой части тепловых потерь. Экономия, например, природного газа при этом повышает экспортные возможности России.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Balatsky A.V., Balatsky G.I., Borysov S.S.* Resource Demand Growth and Sustainability Due to Increased World Consumption Sustainability. 2015. № 7. P. 3430–3440. DOI:10.3390/su7033430.
2. *Avtar R., Tripathi S., Aggarwal A.K., Kumar P.* Population – Urbanization – Energy Nexus: A Review // *Resources*. 2019. № 8. P. 136. DOI:10.3390/resources8030136.
3. *Sach J., Moya D., Giarola S., Hawkes A.* Clustered spatially and temporally resolved global heat and cooling energy demand in the residential sector // *Applied Energy*. 2019. 250. P. 48–62. DOI:org/10.1016/j.apenergy.2019.05.011.
4. *Abikoye B., Cucek L., Isafiade A.J., Kravanja Z.* Synthesis of Solar Thermal Network for Domestic Heat Utilization // *Chemical Engineering Transactions*. 2019. 76. P. 1015–1020. DOI:10.3303/CET1976170.
5. *Čuček L., Boldyryev S., Klemeš J.J., Kravanja Z., Krajačić G., Varbanov P.S., Neven Duić.* Approaches for Retrofitting Heat Exchanger Networks within Processes and Total Sites, *Journal of Cleaner Production* (2018), doi:10.1016/j.jclepro.2018.11.129.
6. *Башмаков И.А.* Использование энергии и энергоэффективность в российском жилищном секторе. Как сделать его низкоуглеродным? // *Энергосовет*. 2014. № 2 (33). С. 22–31.
7. *Голикова А.А., Кондратов Н.А.* Перспективы использования альтернативных источников энергии в Арктической зоне России // *География: развитие науки и образования* : коллективная монография по материалам Всероссийской с международным участием научно-практической конференции LXXII Герценовские чтения, посвященной 150-летию со дня рождения В.Л. Комарова, 135-летию со дня рождения П.В. Гуревича, 90-летию со дня рождения В.С. Жекулина. 2019. С. 241–245.
8. *Экологические проблемы Арктики и северных территорий* : межвузовский сборник научных трудов / отв. ред. П.А. Феклистов. Архангельск : Изд-во: Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, 2017. Вып. 20. 287 с.
9. *Varzut O., Kondratov N., Bahmatova Yu., Shmilova Yu.* Actual problems of sustainable socio-economic and ecological balanced development of the Russian Arctic // In the collection of articles: 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019 Conference proceedings, Sofia. 2019. P. 11–18.
10. *Цветков Н.А., Кривошеин Ю.О.* Автономное теплоснабжение малоэтажных зданий в Республике Саха (Якутия) (п. Жатай) с использованием газовых котлов и энергии солнца // *Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий* : сб. материалов II Всероссийской научной конференции с международным участием, ИТФ СО РАН, 24–26 марта 2015 г. С. 252–259.
11. *Кривошеин Ю.О., Кривошеин Ю.О., Цветков Н.А., Хуторной А.Н.* Автоматизированная дуальная система горячего водоснабжения с использованием энергии солнца и газового котла // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2017. № 1 (60). С. 162–173.
12. *Хуторной А.Н., Цветков Н.А., Кривошеин Ю.О., Кузнецова А.А.* Эффективность использования солнечных вакуумных трубчатых коллекторов в природно-климатических условиях Якутии // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2016. № 3. С. 156–165.
13. *Кривошеин Ю.О., Шемдышев У.Ю., Цветков Н.А.* Анализ эффективности дуальной системы горячего водоснабжения в Городском округе «Жатай» (г. Якутск) // *Избранные доклады 65-й Юбилейной университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых*. Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2019. С. 973–975.
14. *Krivoshein Y.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 // *SEWAN-2019IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020. 408. 012011. DOI:10.1088/1755-1315/408/1/012011.
15. *Ayompe L., Duffy A.* Thermal performance analysis of a solar water heating system with heat pipe evacuated tube collector using data from a field trial // *Solar Energy*. 2013. 90. P. 17–28. doi.org/10.1016/j.solener.2013.01.001.

16. Цветков Н.А., Кривошеин Ю.О., Толстых А.В., Хуторной А.Н. Моделирование инсоляции на горизонтальную поверхность для расчета почасовых значений солнечной радиации // Известия вузов. Строительство. 2019. № 6 (726). С. 81–92. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-726-6-81-92.
17. Krivoshein Y.O., Tolstykh A.V., Tsvetkov N.A., Khutornoi A.N. Mathematical model for calculating solar radiation on horizontal and inclined surfaces for the conditions of Yakutsk // SEWAN-2019 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2020. 408. 012002. DOI:10.1088/1755-1315/408/1/012002.
18. 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. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118577>
19. 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. P. 943–948. DOI:10.3303/CET2081158.

## REFERENCES

1. Balatsky A.V., Balatsky G.I. and Borysov S.S. Resource demand growth and sustainability due to increased world consumption. *Sustainability*. 2015. V. 7. Pp. 3430–3440. DOI: 10.3390/su7033430.
2. Avtar R., Tripathi S., Aggarwal A.K., Kumar P. Population–urbanization–energy nexus: A review. *Resources*. 2019. V. 8. P. 136. DOI: 10.3390/resources8030136.
3. Sach J., Moya D., Giarola S., Hawkes A. Clustered spatially and temporally resolved global heat and cooling energy demand in the residential sector. *Applied Energy*. 2019. V. 250. Pp. 48–62. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.05.011.
4. Abikoye B., Cucek L., Isafiade A.J., Kravanja Z. Synthesis of solar thermal network for domestic heat utilization. *Chemical Engineering Transactions*. 2019. V. 76. Pp. 1015–1020. DOI: 10.3303/CET1976170.
5. Čuček L., Boldyryev S., Klemeš J.J., Kravanja Z., Krajačić G., Varbanov P.S., Neven Duić, Approaches for retrofitting heat exchanger networks within processes and total sites. *Journal of Cleaner Production*. 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.129. (rus)
6. Bashmakov I.A. Ispol'zovanie energii i energoeffektivnost' v rossiiskom zhilishchnom sektore. Kak sdelat' ego nizkouglerodnym? [Energy use and efficiency in the Russian housing sector. How to make it low-carbon?]. *Energosovet*. 2014. No. 2 (33). Pp. 22–31. (rus)
7. Golikova A.A., Kondratov N.A. Perspektivy ispol'zovaniya alternativnykh istochnikov energii v Arkticheskoi zone Rossii [Prospects for using alternative energy sources in Arctic Russia]. In: Geografiya: razvitie nauki i obrazovaniya [Geography: development of science and education]. Kollektivnaya monografiya po materialam Vserossiiskoi s mezhdunarodnym uchastiem nauchno-prakticheskoi konferentsii the 72 Gertsenovskie chteniya, posvyashchennoi 150-letiyu so dnya rozhdeniya V.L. Komarova, 135-letiyu so dnya rozhdeniya P.V. Gurevicha, 90-letiyu so dnya rozhdeniya V.S. Zhekulina (*Coll. Monograph adapted from 72nd All-Russ. Conf. in memory of V.L. Komarov, P.V. Gurevich and V.S. Zhekulina 'Gertsen Readings'*). 2019. Pp. 241–245. (rus)
8. Feklistov P.A., (Ed.) Ekologicheskie problemy Arktiki i severnykh territorii: mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov [Environmental problems in the Arctic and northern territories]. *Int. Coll. Papers*. 2017. No. 20. 287 p. (rus)
9. Barzut O., Kondratov N., Bahmatova Yu., Shmilova Yu. Actual problems of sustainable socio-economic and ecological balanced development of Russian Arctic. In: *Proc. 19th Int. Sci. Conf. 'GeoConference'*, Sofia, 2019. Pp. 11–18.
10. Tsvetkov N.A., Krivoshein Yu.O. Avtonomnoe teplosnabzhenie maloetazhnykh zdaniy v respublike SAKhA Yakutiya (p. Zhatai) s ispol'zovaniem gazovykh kotlov i energii solntsa [Autonomous heating of low-rise buildings in the Republic of Saha, Yakutia (Zhatai village) using gas boilers and solar energy]. *Energo- i resursoeffektivnost' maloetazhnykh zhilykh zdaniy: sb. materialov II Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym*

- uchastiem (Proc. 2nd All-Russ. Sci. Conf. 'Energy- and Resource-Efficiency of Low-Rise Buildings'). 2015 Pp. 252–259. (rus)
11. Krivoshein Yu.O., Krivoshein Yu.O., Tsvetkov N.A., Khutornoi A.N. Avtomatizirovannaya dual'naya sistema goryachego vodosnabzheniya s ispol'zovaniem energii solntsa i gazovogo kotla [Automated dual system of hot water supply provided with solar energy and gas boiler]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017. No. 1 (60). Pp. 162–173. (rus)
  12. Khutornoi A.N., Tsvetkov N.A., Krivoshein Yu.O., Kuznetsova A.A. Effektivnost' ispol'zovaniya solnechnykh vakuumnykh trubchatykh kollektorov v prirodno-klimaticheskikh usloviyakh Yakutii [Effective utilization of vacuum tube solar collectors in climatic conditions in Yakutia]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016. No. 3. Pp. 156–165. (rus)
  13. Krivoshein Yu.O., Shemdyshv U.Yu., Tsvetkov N.A. Analiz effektivnosti dual'noi sistemy goryachego vodosnabzheniya v Gorodskom okruge Zhatai (g. Yakutsk) [Analysis of efficiency of dual hot water supply system in Zhatay City (Yakutsk)]. In: Izbrannye doklady 65 Yubileinoi universitetskoj nauchno-tehnicheskoi konferentsii studentov i molodykh uchenykh (Proc. 65th All-Russ. Sci. Conf. of Students and Young Scientists). Tomsk: TSUAB, 2019. Pp. 973–975. (rus)
  14. Krivoshein Y.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 Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020. V. 408. 012011. DOI:10.1088/1755-1315/408/1/012011.
  15. Ayompe L., Duffy A. Thermal performance analysis of a solar water heating system with heat pipe evacuated tube collector using data from a field trial. *Solar Energy*. 2013. V. 90. Pp. 17–28. DOI: 10.1016/j.solener.2013.01.001.
  16. Tsvetkov N.A., Krivoshein Yu.O., Tolstykh A.V., Khutornoi A.N. Modelirovanie insolyatsii na gorizont'al'nyu poverkhnost' dlya rascheta pochasovykh znachenii solnechnoi radiatsii [Simulation of insolation on horizontal surface for calculation of hourly values of solar radiation]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2019. No. 6 (726). Pp. 81–92. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-726-6-81-92.
  17. Krivoshein Y.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. V. 408. 012002. DOI: 10.1088/1755-1315/408/1/012002.
  18. 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
  19. 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. V. 81. Pp. 943–948. DOI: 10.3303/CET2081158.

#### Сведения об авторах

Кривошеин Юрий Олегович, ст. преподаватель, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, yurak89@list.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

Хуторной Андрей Николаевич, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, khantgs@mail.ru

*Колесникова Анна Владимировна*, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, ann203040@yandex.ru

*Петрова Алена Владимировна*, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, pvarnn@mail.ru

#### **Authors Details**

*Yuriy O. Krivoshein*, Senior Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq, 634003, Tomsk, Russia, yurak89@list.ru

*Nikolay 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, tolstbu@yandex.ru

*Andrey N. Khutornoy*, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq, 634003, Tomsk, Russia, khantgs@mail.ru

*Anna V. Kolesnikova*, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq, 634003, Tomsk, Russia, ann203040@yandex.ru

*Alena V. Petrova*, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq, 634003, Tomsk, Russia, pvarnn@mail.ru