

# ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ УСТАНОВКИ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ДЛЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ДОМОВ

Т. Н. Белоглазова, Т. Н. Романова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия

## FEASIBILITY STUDY OF SOLAR COLLECTORS INSTALLATION FOR PRIVATE RESIDENCE

Tatyana N. Beloglazova, Tatyana N. Romanova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

**Аннотация.** В системе горячего водоснабжения города Перми используется солнечная энергия. Целью исследования являлось обоснование экономической эффективности применения солнечных коллекторов и определение срока их окупаемости с учетом климатических условий, стоимости оборудования и экономических критериев. Анализ принятых технических решений использования солнечной энергии выполнен в сравнении с электрическим нагревом. В ходе исследования была определена необходимая минимальная площадь солнечных коллекторов для домовладения (с учетом норматива горячего водоснабжения для Перми) как функциональная зависимость величины поступающей солнечной инсоляции и количества используемой тепловой энергии. Произведены оценка и выбор параметров солнечных коллекторов отечественного и импортного производства. Доходом для домовладения принята величина снижения платы за электрическую энергию. Расчет экономической эффективности выполнен на основе прогнозного среднего тарифа на электрическую энергию с учетом инфляции от 2 до 16 %. Окупаемость системы солнечного нагрева горячей воды за

**Abstract.** The hot water supply system of Perm uses solar energy. The aim of the study was to substantiate the economic efficiency of solar collectors and determine their payback period taking into account climatic conditions, equipment cost and economic criteria. The proposed technical solutions of solar energy using were analyzed and compared with electric heating. During the study, the authors defined the required minimum solar collector area for a household (taking into account the hot water standard for Perm) as a functional dependence of the amount of incoming solar insolation on the amount of using heat energy. We evaluated domestic and imported solar collectors on the required parameters. The value of the reduction in the payment for electric energy was taken as the income for the households. The economic efficiency was calculated based on the forecasted average electricity tariff, taking into account inflation from 2 to 16 %. The payback of a solar hot water heating system depends primarily on the cost of purchase, installation of equipment and on the discount rate. The practical significance is to substantiate the economic efficiency of solar collectors for consumers. The methodology and results of the

висит в первую очередь от затрат на приобретение, монтаж оборудования и норму дисконтирования. Практическое значение заключается в обосновании экономической эффективности применения солнечных коллекторов для потребителей. Методика и результаты исследования могут быть использованы в индивидуальном жилом строительстве и для обоснования применения альтернативных источников энергии для регионов России с низким значением инсоляции.

**Ключевые слова:** солнечная энергия, экономическая эффективность, горячее водоснабжение, холодный период, системы солнечного теплоснабжения

**Для цитирования:** Белоглазова, Т. Н. Технико-экономическое обоснование установки солнечных коллекторов для индивидуальных домов / Т. Н. Белоглазова, Т. Н. Романова. – DOI 10.31660/2782-232X-2024-1-45-57. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2024. – № 1 (107). – С. 45–57.

**For citation:** Beloglazova, T. N. & Romanova, T. N. (2024). Feasibility study of solar collectors installation for private residence. Architecture, Construction, Transport, (1(107)), pp. 45-57. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2024-1-45-57.

## 1. Введение

Индивидуальные дома для многих являются более предпочтительным видом жилья по ряду причин, в том числе экономических. У жильцов собственного дома есть возможность управлять потреблением энергоресурсов исходя из индивидуальных представлений о комфорте [1, 2] и решать вопросы энергообеспечения в случае проживания вдали от централизованных линий энергоснабжения [3, 4], что соответствует энергетической стратегии России на период до 2030 года.

Одним из возможных способов оптимизации энергозатрат на теплоснабжение является применение солнечной энергии. Системы пассивного солнечного отопления способны без использования дополнительного оборудования аккумулировать солнечное тепло [5, 6]; затраты на устройство такой системы могут составлять от 1 до 10 % стоимости строительства здания. При этом в южных регионах России может быть обеспечен положительный энергобаланс в течение всего года, тогда как в умеренном климате в

study can be used in private residential construction and in justification of the use of alternative energy sources for Russian regions with low insolation.

**Key words:** solar energy, efficiency, hot water supply, cold period, solar heating systems

холодный период самостоятельное функционирование системы невозможно и требует дополнительных затрат [7]. Использование солнечной энергии, предусматривающее применение инженерного оборудования для ее улавливания, преобразования и использования, является активным.

Выбор в пользу использования солнечного тепла как источника энергии для индивидуальных потребителей основывается на ряде факторов, которые следует принимать во внимание. Во-первых, необходимо учитывать условия, являющиеся объективными: величину и продолжительность солнечной освещенности в течение суток, наличие снежного покрова, запыленность воздуха, характер потребления энергии. На территории России интенсивность солнечной энергии имеет неравномерный характер (рис. 1), поэтому для разных регионов подразумевается индивидуальный стартовый потенциал.

Во-вторых, значение имеет наличие альтернативных (резервных) источников энер-

гии: газового, твердого или жидкого топлива, электроэнергии. Стоимость энергоносителей, возможность подключения к сетям и условия доставки энергоресурсов сравниваются по экономическим критериям с установками использования солнечной энергии.

В-третьих, должны учитываться технические критерии и стоимость солнечных установок и вспомогательного оборудования для подключения к системе энергопотребления, которые значительно дифференцируются в зависимости от производителя и уровня автоматической оснащённости объекта.

Без анализа всех вышеперечисленных факторов экономический эффект применения солнечных установок для потребителя не является объективно обоснованным, поэтому методику расчета солнечной системы и выбора оборудования необходимо дополнять расчетом экономических параметров.

Технологии использования солнечной энергии различаются как по принципу трансформации, так и по объему. Солнечная энергия с помощью фотоэлектрических систем преобразуется в электрическую, накапливается в системах хранения и используется при работе электрических приборов. В солнечных коллекторах (СК) энергия солнечного излучения преобразуется в тепловую энергию теплоносителя и используется в системе энергообеспечения объекта.

В 2022 году был зафиксирован рекордный прирост в мире (191 ГВт) установленных мощностей солнечных фотоэлектрических установок. Совокупная установленная мощность таких систем достигла 1 ТВт<sup>1</sup>. По всему миру эксплуатируется более 746 млн м<sup>2</sup> солнечных коллекторов установленной тепловой мощностью 522 ГВт<sup>2</sup>.

В настоящее время системы солнечного теплоснабжения (ССТ) распространены во многих регионах мира, но наибольшую популярность



Рис. 1. Зонирование территории России по солнечной освещенности  
Fig. 1. Zoning of the Russian territory by solar illumination

<sup>1</sup> World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway. – Текст : электронный // IRENA : International Renewable Energy Agency : сайт. – URL: <https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook-2023> (date of the application: 17.02.2024).

<sup>2</sup> Weiss W. Solar heat worldwide. Global Market Development and Trends 2022 Detailed Market Figures 2021 / W. Weiss, M. Spörk-Dür. – URL: <https://www.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/Solar-Heat-Worldwide-20231.pdf> (date of the application: 17.02.2024). – Текст : электронный.

такие системы получили в солнцезабыточных странах. Многочисленные зарубежные научные публикации подтверждают интерес к этому направлению энергетики. Исследователи рассматривают разные аспекты данной тематики, например, изучению тепловых характеристик солнечного коллектора с вакуумными трубками на примере условий Александрии посвящена работа [8]; технико-экономическое обоснование электрификации отеля Cedars с применением фотоэлектрической системы в Аммане представлено в [9]; вопросы потребления энергии за счет солнечной инсоляции в жилом секторе города в условиях Иордании рассмотрены в [10]; результаты исследования компьютерного моделирования нагрева воды для бытовых нужд в Турции для девяти различных регионов рассмотрены в [11] и показывают, что перед установкой системы необходимо провести предварительную оценку оптимальной площади коллектора с учетом первоначальных затрат на его установку и с расчетом на долгосрочное перспективное использование.

В регионах с холодным климатом необходимы системы отопления и горячего водоснабжения (ГВС) зданий. В регионах Сибири и Дальнего Востока ССТ приобретают все большее распространение [12]. Положения нормативных и справочных материалов содержат общие рекомендации по оценке экономической эффективности применения существующих технологий. При этом для индивидуальных потребителей требуются дополнительные разъяснения. Технико-экономическое обоснование применения СК индивидуальными частными домами чаще осуществляется на основе величины снижения платы за альтернативный ресурс и не учитывает комплексного характера стоимости оборудования и таких экономических критериев, как инфляция на энергетические ресурсы и дисконтирование. С учетом того, что в России есть города и небольшие населенные пункты с годовой солнечной освещенностью менее 1 700 часов, всесторонний анализ применения солнечных коллекторов в индивидуальных жилых домах проводился на примере города Перми с таким же уровнем солнечной освещенности. Решена задача определения

площади поверхности нагрева за счет солнечной энергии и проведено сравнение с техническими параметрами моделей СК. Для конкретного нормативного значения потребления энергии для нужд горячего водоснабжения технико-экономический анализ призван определить период, за который принятые решения окупаются при различных сочетаниях нормы дисконтирования и инфляции на электрическую энергию, которая принята для сравнения.

В качестве основного оборудования ССТ применяется панель солнечного коллектора (теплообменник, приемник), где осуществляется поглощение и передача энергии излучения теплоносителю. Теплообменники плоской конструкции имеют сравнительно меньшую стоимость и преимущественно рекомендуются к применению при температуре нагрева теплоносителя до 100 °С. Солнечные коллекторы обеспечивают работу систем нагрева теплоносителя за счет прямого и рассеянного излучения при ясной и облачной погоде. Для резервного источника тепла для ГВС можно принять электронагреватель (рис. 2) [3]. Для индивидуальных систем ГВС

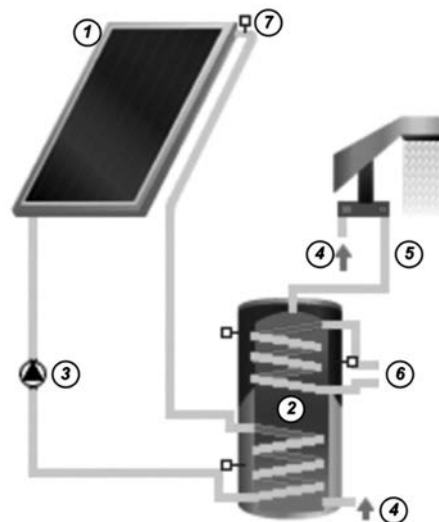


Рис. 2. Схема системы ГВС с плоским солнечным коллектором: 1 – солнечный коллектор; 2 – аккумулятор тепла; 3 – циркуляционный насос; 4 – холодная вода; 5 – горячая вода; 6 – дополнительный подогреватель; 7 – клапан воздушный

Fig. 2. Scheme of DHW system with a flat solar collector: 1 – solar collector; 2 – heat accumulator; 3 – circulation pump; 4 – cold water; 5 – hot water; 6 – additional heater; 7 – air valve

суточную потребность в горячей воде могут обеспечить баки-аккумуляторы объемом 100–200 л.

Исследования работы ССТ проводятся многими авторами как с точки зрения особенностей функционирующих установок [3], так и с учетом особенностей математических моделей процесса учета поступающей солнечной радиации [13]. При отсутствии данных в конкретном географическом пункте о параметрах солнечного излучения предлагается использовать данные экспериментальных измерений [14].

Поскольку поступление солнечной энергии является вероятностно-переменным фактором, для технико-экономического расчета установки ССТ бытового потребителя принимались значения среднемесячной часовой плотности солнечной радиации. Часовые данные поступления солнечной радиации имеют определяющее значение при выборе конструктивных особенностей модели приемника солнечной радиации, выбора аккумулирующей емкости, скоростного режима и свойств теплоносителя. Столь точные данные необходимы при разработке паспорта модели приемника излучения и для анализа работы конкретного устройства в заданных условиях. Технологии изготовления СК отработаны, их параметры у разных производителей существенно не изменяются, а ресурс повышения эффективности и резервы снижения стоимости [15] практически исчерпаны.

Эффект использования СК в течение года зависит от интенсивности солнечного излучения и площади приемной поверхности коллекторов. Поэтому тепловая эффективность применения одних и тех же моделей изменяется при разном характере потребления энергии в зависимости от региона. Для индивидуальных потребителей важными обстоятельствами являются умень-

шение затрат на энергообеспечение, выбор доступного энергоресурса, в том числе за счет возобновляемых источников энергии (ВИЭ), затрат, связанных с покупкой оборудования, монтажными работами и эксплуатационными расходами при обслуживании [16].

Наиболее наглядную оценку эффективности принятых решений для индивидуальных потребителей жилых домов дают критерий срока окупаемости и дисконтированные затраты (приведенные затраты) при сравнении доступных для реализации вариантов<sup>3</sup>.

## 2. Материалы и методы

В качестве примера реализации предложенного подхода был произведен расчет применения СК в условиях города Перми для целей ГВС на хозяйственно-бытовые нужды.

Город Пермь расположен на территории с солнечной освещенностью менее 1 700 часов в год (рис. 1). Для индивидуального жилого дома с количеством трех проживающих производилась оценка использования СК как с точки зрения возможности уменьшения затрат на оплату энергоресурсов, так и с учетом первоначальных затрат на оборудование ССТ.

Методика оценки эффективности применения СК для индивидуальных жилых домов для целей ГВС предусматривает математическое описание потребления, поступление солнечной энергии в рассматриваемом регионе, технические параметры конкретного оборудования, экономические показатели.

Характер потребления теплоносителя на ГВС определяется количеством людей, проживающих в доме. Для одного потребителя месячный объем теплоносителя принят по нормативу для города Перми  $V_{ж} = 2.743 \text{ м}^3$ . Температура тепло-

<sup>3</sup> Рекомендации по оценке экономической эффективности инвестиционного проекта теплоснабжения. Общие положения = Guidelines for the rating of economic efficiency heat supply investment project. Generalities : Р НП «АВОК» 5-2006 : утверждены и введены в действие приказом Президента НП «АВОК» от 17 апреля 2006 г. / разработан творческим коллективом специалистов некоммерческого партнерства «Инженеры по отоплению, вентиляции, кондиционированию воздуха, теплоснабжению и строительной теплофизике» (НП «АВОК»). – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200059875> (дата обращения: 07.03.2023).

носителя в системе ГВС  $t_{ж2}$  не должна превышать 65 °С. В принятой методике допускается для индивидуального жилого дома снижение температуры теплоносителя в системе ГВС, но не менее 45 °С при среднемесечном расходе воды на ГВС для трех человек  $G_{ж} = 8064.42$  кг.

Определение количества расположенных горизонтально СК производим с учетом поглощенной солнечной энергии в месяц. Количество удельной тепловой энергии  $q$ , МДж/м<sup>2</sup>, вырабатываемой горизонтальным СК в месяц, определяется:

$$q = q_{np} - \Delta q_{np}, \quad (1)$$

где  $q_{np}$  – удельный поток солнечной энергии, поглощаемой поверхностью приемника СК, МДж/м<sup>2</sup>;  $\Delta q_{np}$  – теплопотери приемника СК в окружающую среду, МДж/м<sup>2</sup>.

$$q_{np} = E_{np} \cdot \tau_{np} \cdot \alpha_{np}, \quad (2)$$

$$\Delta q_{np} = k_{np} (t_{np} - t_n) \cdot N \cdot 3.6 \cdot 10^{-3}, \quad (3)$$

где  $E_{np}$  – облученность горизонтального приемника, МДж/м<sup>2</sup> (согласно табл. 8.1<sup>4</sup>);

$\tau_{np}$  – коэффициент пропускания прозрачного покрытия ( $\tau_{np} = 0.9$ );

$\alpha_{np}$  – коэффициент поглощения приемной поверхностью ( $\alpha_{np} = 0.95$ );

$t_{np}$  – температура поверхности приемника, °С;

$t_n$  – среднемесячная наружная температура, °С;

$k_{np}$  – коэффициент теплопередачи приемной поверхности ( $k_{np} = 3.7$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С));

$N$  – количество дней в месяце.

Теплота  $Q_{ж}$ , МДж/мес., для нагревания воды у потребителя:

$$Q_{ж} = G_{ж} \cdot c_{ж} \cdot (t_{ж2} - t_{ж1}) \cdot 10^{-6}, \quad (4)$$

где  $t_{ж1}$  – температура входящей жидкости в приемник, принимается равной температуре окру-

жающей среды для расчетного периода времени, но не ниже +5°, °С;

$t_{ж2}$  – температура выходящей жидкости из приемника, °С;

$c_{ж}$  – теплоемкость жидкости, Дж/(кг·°С);

$G_{ж}$  – массовый расход жидкости, кг/мес.

Суммарная расчетная площадь поверхности СК  $F$ , м<sup>2</sup>, для расчетного периода времени определяется:

$$F = \frac{Q_{ж}}{q}. \quad (5)$$

Количество коллекторов  $n$ , принимаемых к установке:

$$n = \frac{F}{F_1}, \quad (6)$$

где  $F_1$  – площадь одного коллектора, принятая по техническим данным, м<sup>2</sup>, ( $F_1 = 2$  м<sup>2</sup>).

Количество коллекторов зависит от технических характеристик моделей. При поверочном расчете конкретной модели коллекторов уточняется значение температуры горячей воды у потребителя  $t_{ж2}$ . Вопрос часовой неравномерности в модели не рассмотрен, поскольку предусмотрена установка теплообменника ГВС с резервным источником. Необходимый догрев воды осуществляется электронагревателем, установленным дополнительно в теплообменнике ГВС.

Расчет СК произведен для климатических условий г. Перми для всех месяцев года, результаты представлены в таблице 1.

В итоге определения количества СК представлено наибольшее их число  $n$  с округлением для площади панели 2 м<sup>2</sup> для каждого из месяцев, обеспечивающее нагрузку на ГВС жилого дома в полном объеме.

Для 4 месяцев (с мая до августа) достаточно 1 панели СК. При уменьшении поступления солнечной энергии в апреле и в сентябре расчет энергии, получаемой за счет инсоляции, допол-

<sup>4</sup> Строительная климатология = Building climatology : СП 131.13330.2020 : утвержден приказом Министерства строительства и ЖКХ РФ от 24 декабря 2020 г. № 859/пр и введен в действие с 25 июня 2021 г. / исполнители – ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН) при участии ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория имени А. И. Воейкова (ФГБУ «ГГО»). – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573659358> (дата обращения: 07.03.2023).

нен резервным источником электрической энергии, который обеспечивает догрев воды для ГВС.

При установке 2-х панелей СК нагрев горячей воды за счет солнечной энергии может полноценно осуществляться в течение 6 месяцев (с апреля по сентябрь).

Критериями экономической эффективности технического решения по использованию СК для ГВС выбраны срок окупаемости и чистый дисконтированный доход (согласно Р НП «АВОК» 5-2006). Другие показатели не рассматриваются для индивидуального потребителя. Экономические показатели определены с учетом влияния на них нормы дисконтирования и инфляции на электрическую энергию.

В соответствии с возможной динамикой ставки рефинансирования ЦБ норма дисконтирования принята в диапазоне от 2 до 16 %:

$$\text{ЧДД} = \Delta\text{Д} \frac{1 - (1+r)^{-T_{\text{пр}}}}{r} - K, \quad (7)$$

где ЧДД – доход за расчетный период с учетом дисконтирования, руб.;

K – затраты на покупку и монтаж СК, руб.;

ΔД – годовой доход, связанный с экономией затрат на электроэнергию, руб./год (в дальнейшем используемый как сэкономленные на электроэнергии средства);

r – норма дисконта, д. ед.;

$T_{\text{пр}}$  – горизонт расчета, год.

Горизонт расчета принят равным 5 годам из условия рекомендуемого срока эксплуатации СК.

Срок окупаемости с учетом дисконтирования определяется по формуле:

$$T_0 = \frac{-\ln(1-rT_0)}{\ln(1+r)}, \quad (8)$$

где  $T_0$  – срок окупаемости без дисконта, год, определяется:

$$T_0 = \frac{K}{\Delta\text{Д}}. \quad (9)$$

Годовым доходом принято снижение затрат на оплату электричества как альтернативного источника нагрева. При горизонте расчета 5 и 10 лет тарифы на электрическую энергию изменяются и рассчитываются по средним значениям. Динамика роста тарифов на электрическую энергию принята от 2 до 10 %.

Таблица 1/Table 1

Расчет количества солнечных коллекторов для г. Перми  
Calculation of the number of solar collectors for Perm

| Наименование параметра | Значение параметра |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Месяц года             | I                  | II    | III   | IV    | V     | VI    | VII   | VIII  | IX    | X     | XI    | XII   |
| $N$                    | 31                 | 28    | 31    | 30    | 31    | 30    | 31    | 31    | 30    | 31    | 30    | 31    |
| $t_n$                  | −13.9              | −12.3 | −4.5  | 3.5   | 10.6  | 15.8  | 18.2  | 15.1  | 9.5   | 2.3   | −5.6  | −11.3 |
| $t_{ж1}$               | 5                  | 5     | 5     | 5     | 10.6  | 15.8  | 18.2  | 15.1  | 9.5   | 5     | 5     | 5     |
| $t_{пр}$               | 23.05              | 23.85 | 27.75 | 31.75 | 35.3  | 37.9  | 39.1  | 37.55 | 34.75 | 31.15 | 27.2  | 24.35 |
| $t_{ж2} - t_{ж1}$      | 55                 | 55    | 55    | 55    | 49.4  | 44.2  | 41.8  | 44.9  | 50.5  | 55    | 55    | 55    |
| $D$                    | 15.3               | 13.5  | 13.3  | 11.3  | 10.2  | 8.8   | 8.6   | 9.3   | 10.1  | 11.9  | 13.1  | 14.7  |
| $q_{пр}$               | 77.8               | 164.2 | 360.0 | 541.2 | 727.6 | 775.5 | 750.7 | 595.1 | 400.1 | 228.3 | 100.9 | 50.4  |
| $q$                    | 62.5               | 150.7 | 346.6 | 529.9 | 717.4 | 766.7 | 742.1 | 585.8 | 390.1 | 216.4 | 87.8  | 35.7  |
| $Q_{ж}$                | 1858               | 1858  | 1858  | 1858  | 1669  | 1493  | 1412  | 1517  | 1706  | 1858  | 1858  | 1858  |
| $F$                    | 29.7               | 12.3  | 5.4   | 3.5   | 2.3   | 1.9   | 1.9   | 2.6   | 4.4   | 8.6   | 21.2  | 52.0  |
| $n$                    | 15                 | 6     | 3     | 2     | 1     | 1     | 1     | 1     | 2     | 4     | 11    | 26    |

### 3. Результаты и обсуждение

Таким образом, за базовые варианты сравнения для жилого индивидуального дома в г. Перми принимаем установку одного или двух коллекторов, работающих на воде за пределами отопительного периода. В холодный период работа СК не рассматривается из-за сложности обслуживания ввиду образования снежного покрова и необходимости использования вместо воды незамерзающих растворов. Стоимость СК принята на основе анализа данных оборудования отечественного и импортного производства. Ориентировочные данные по характеристикам ряда моделей, представленных на отечественном рынке, приведены в таблице 2.

При оценке экономической эффективности установки СК в рассмотренных вариантах учтены затраты на приобретение и монтаж СК. При установке одного СК затраты составляют 41 000 руб., для двух СК – 85 200 руб. Прочие затраты на дополнительное оборудование не учитываются, поскольку при реализации работы системы ГВС циркуляционный насос и теплообменник емкостного типа предусмотрены к установке вне

зависимости от источника теплоснабжения. Теплообменник оборудован дополнительно электрическим нагревом. Таким образом, альтернативным солнечному нагреву предусматривается нагрев за счет электрической энергии [17].

Среднее значение прогнозируемого тарифа на электрическую энергию с учетом инфляции для пятилетнего и десятилетнего горизонта планирования приведены в таблицах 3 и 4 соответственно.

Количество тепловой энергии за счет работы ССТ при установке одной панели СК для нагрева воды на ГВС до температуры не менее 55 °С в среднем составляет 2043.8 кВт/год при использовании с апреля по сентябрь.

При установке двух панелей температура воды достигает от 60 до 65 °С, а количество тепловой энергии в период с марта по сентябрь может достигать 4531.7 кВт/год.

При условии использования воды в системе ГВС для трех человек в среднем полезно используемая тепловая энергия на ГВС при двух панелях составит 3099.6 кВт/год, так как на другие цели использование тепла не предусмотрено.

Таблица 2/Table 2

*Характеристики моделей солнечных коллекторов, представленных на отечественном рынке*  
*Characteristics of solar collector models on the domestic market*

| Модель<br>(страна-производитель) /<br>Источник информации              | Габаритная<br>площадь, м <sup>2</sup> | Апертура,<br>$F_1$ , м <sup>2</sup> | $\alpha_{np}$ | $\tau_{np}$ | $k_{np}$ , Вт/<br>(м <sup>2</sup> ·°С) | Гарантия,<br>лет | Цена, руб.    |
|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------|-------------|----------------------------------------|------------------|---------------|
| Сокол-Эффект-А (Россия) / Avtonomno.pro                                | 2.19                                  | 2.06                                | 0.95          | 0.95        | –                                      | 15               | 41 000        |
| ЯSolar (Россия) / Avtonomno.pro                                        | 2.1                                   | 2.00                                | 0.95          | 0.92        | –                                      | 5                | 41 230        |
| Светогрей стандарт-2 (Россия) / Avtonomno.pro                          | 1.82                                  | 1.82                                | 0.95          | 0.95        | –                                      | –                | 30 400        |
| ATMOSFERA F2M (Польша) / atmosfera.msk.ru                              | 2                                     | –                                   | 0.95          | 0.95        | 3.33                                   | –                | по<br>запросу |
| Galmet KSG Regal 21 (Польша) / gag.by                                  | 2.1                                   | 1.94                                | 0.95          | 0.96        | 3.8                                    | 10               | 96 140        |
| Vaillant auroTHERM classic VFK 135/2 D (Германия) /<br>vaillant.com.ru | 2.51                                  | 2.35                                | 0.93          | 0.91        | 3.64                                   | 2                | 49 000        |
| Hummel FKHE 2.5 MS (Германия) /<br>gelioservice.ru                     | 2.5                                   | 2.3                                 | 0.95          | 0.91        | 3.73                                   | 10               | 78 880        |
| Buderus Logasol SKN 4.0-w<br>(Германия) / будерус.рф                   | 2.37                                  | 2.10                                | 0.96          | 0.95        | 3.68                                   | 2                | 115 463       |
| Energy EVO 23 (Греция) / dimas-solar.gr                                | 2.24                                  | 2.05                                | 0.95          | 0.92        | 3.62                                   | 10               | по<br>запросу |

Таблица 3/Table 3

Средний тариф на электроэнергию с учетом темпа инфляции за 5 лет (руб./кВт-ч)  
Average electricity tariff taking into account the inflation rate for 5 years (RUB/kWh)

| Наименование параметра               | Значение параметра |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------------------------|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Прогнозный темп инфляции, %          | 2                  | 4    | 6    | 8    | 10   | 12   | 14   | 15   | 16   |
| Тариф на электроэнергию (руб./кВт-ч) | 5.26               | 5.47 | 5.69 | 5.93 | 6.17 | 6.42 | 6.68 | 6.81 | 6.95 |

Таблица 4/Table 4

Средний тариф на электроэнергию с учетом темпа инфляции за 10 лет (руб./кВт-ч)  
Average electricity tariff taking into account the inflation rate for 10 years (RUB/kWh)

| Наименование параметра               | Значение параметра |      |      |      |      |      |      |       |       |
|--------------------------------------|--------------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Прогнозный темп инфляции, %          | 2                  | 4    | 6    | 8    | 10   | 12   | 14   | 15    | 16    |
| Тариф на электроэнергию (руб./кВт-ч) | 5.53               | 6.06 | 6.66 | 7.32 | 8.05 | 8.86 | 9.77 | 10.25 | 10.77 |

Таблица 5/Table 5

Расчеты для ГВС при установке СК для горизонта планирования 5 лет  
Calculations for DHW when installing a solar collector for a planning horizon of 5 years

| Наименование параметра                             | Значение параметра |         |         |         |         |         |         |         |
|----------------------------------------------------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Норма дисконтирования, %                           | 2                  | 4       | 6       | 8       | 10      | 12      | 14      | 16      |
| <b>При установке 1-го СК</b>                       |                    |         |         |         |         |         |         |         |
| Сэкономленные средства за электроэнергию, руб./год | 10 742             | 11 180  | 11 636  | 12 110  | 12 602  | 12 602  | 12 602  | 12 602  |
| Бездисконтный срок окупаемости, год                | 4.9                | 4.7     | 4.5     | 4.3     | 4.1     | 4.1     | 4.1     | 4.1     |
| Срок окупаемости с дисконтированием, год           | 5.3                | 5.3     | 5.4     | 5.4     | 5.5     | 5.9     | 6.4     | 7.1     |
| Чистый дисконтированный доход, руб.                | -2 004             | -42 983 | -42 962 | -42 944 | -42 926 | -42 910 | -42 895 | -42 882 |
| <b>При установке 2-х СК</b>                        |                    |         |         |         |         |         |         |         |
| Сэкономленные средства за электроэнергию, руб./год | 16 292             | 16 956  | 17 647  | 18 366  | 19 112  | 19 112  | 19 112  | 19 112  |
| Бездисконтный срок окупаемости, год                | 7.1                | 6.7     | 6.4     | 6.0     | 5.7     | 5.7     | 5.7     | 5.7     |
| Срок окупаемости с дисконтированием, год           | 7.7                | 8.0     | 8.3     | 8.6     | 8.9     | 10.3    | 12.4    | 16.8    |
| Чистый дисконтированный доход, руб.                | -28 487            | -28 676 | -28 805 | -28 877 | -28 895 | -31 658 | -34 208 | -36 567 |

Результаты технико-экономического обоснования применения СК для нужд горячего водоснабжения для горизонта расчета 5 и 10 лет представлены в таблицах 5 и 6 соответственно.

Средний тариф не рассматривается для инфляции на электрическую энергию более 10 %, так как для потребителей подобная динамика

роста не является социально обоснованной.

При исследовании горизонта планирования 5 лет выявлено, что дисконтированный срок окупаемости при значении нормы дисконтирования 2 % и темпа инфляции на электрическую энер-

гию 2 % минимальный для рассмотренных условий применения СК.

При увеличении горизонта планирования до 10 лет установка СК для ГВС в условиях города Перми с периодом работы с апреля по сентябрь окупается. Величина дисконтированного дохода при установке одного СК изменяется в 1.7 раза, при установке двух СК – в 2.8 раза в зависимости от нормы дисконтирования.

В пределах горизонта расчета 5 лет варианты установки СК для ГВС с учетом неравноценности капитальных затрат и получения выгоды от снижения платы за электрическую энергию не окупаются, что связано со значительными затратами на приобретение и монтаж оборудования. Также это связано с принятыми условиями использования горячей воды – только на бытовые нужды потребителей в количестве трех человек и использованием солнечной энергии только в течение теплого периода.

Работа установки солнечных коллекторов в холодный период не рассматривалась, что связано с особенностями ее эксплуатации (снежным покровом, отрицательными температурами) и незначительным поступлением солнечной энергии в холодный период в рассматриваемом регионе.

Установка СК окупается за счет уменьшения капитальных затрат на 10 % с учетом дисконтирования в течение 5 лет данного технического решения при рассмотренных значениях нормы дисконтирования. Оптимизация расходов потребителей на приобретение и использование энергосберегающего оборудования возможна за счет различных мер, например, налоговых льгот, целевых дотаций для многодетных семей и других мероприятий.

При рассмотрении установки СК в десятилетнем горизонте планирования можно отметить, что установка окупается за счет увеличения

Таблица 6/Table 6

Расчеты для ГВС при установке СК для горизонта планирования 10 лет  
Calculations for DHW when installing a solar collector for a planning horizon of 10 years

| Наименование параметра                             | Значение параметра |        |        |        |        |        |        |        |
|----------------------------------------------------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Норма дисконтирования, %                           | 2                  | 4      | 6      | 8      | 10     | 12     | 14     | 16     |
| <b>При установке 1-го СК</b>                       |                    |        |        |        |        |        |        |        |
| Сэкономленные средства за электроэнергию, руб./год | 11 302             | 12 392 | 13 604 | 14 952 | 16 450 | 16 450 | 16 450 | 16 450 |
| Бездисконтный срок окупаемости, год                | 4.6                | 4.2    | 3.7    | 3.3    | 3.0    | 3.0    | 3.0    | 3.0    |
| Срок окупаемости с дисконтированием, год           | 4.9                | 4.6    | 4.3    | 4.0    | 3.7    | 3.9    | 4.1    | 4.4    |
| Чистый дисконтированный доход, руб.                | 39 785             | 40 634 | 41 853 | 43 438 | 45 388 | 38 309 | 32 093 | 26 610 |
| <b>При установке 2-х СК</b>                        |                    |        |        |        |        |        |        |        |
| Сэкономленные средства за электроэнергию, руб./год | 17 140             | 18 794 | 20 632 | 22 676 | 24 947 | 24 947 | 24 947 | 24 947 |
| Бездисконтный срок окупаемости, год                | 6.6                | 5.9    | 5.2    | 4.6    | 4.1    | 4.1    | 4.1    | 4.1    |
| Срок окупаемости с дисконтированием, год           | 7.2                | 6.8    | 6.4    | 6.0    | 5.6    | 6.0    | 6.6    | 7.2    |
| Чистый дисконтированный доход, руб.                | 30 495             | 32 680 | 35 301 | 38 374 | 41 915 | 31 688 | 22 707 | 14 786 |

среднего прогнозируемого тарифа на электричество и увеличения периода получения выгоды от 5 до 10 лет при равных капитальных затратах. Для обеспечения условия окупаемости срок службы выбранного СК должен быть не менее горизонта планирования. Несмотря на то, что в расчетах учтены затраты на работу циркуляционного насоса и автоматических устройств, при условии увеличения тарифа на электрическую энергию выгода от установки СК для конкретного потребителя отразится на снижении платежей в меньшей степени, чем в представленных расчетах, что связано с общим потреблением электрической энергии для домовладения.

#### 4. Заключение

1. При установке одного СК для нужд ГВС для индивидуального потребителя в условиях города Перми при горизонте планирования 5 лет в зависимости от темпа роста тарифа на электрическую энергию минимальный бездисконтный срок окупаемости составляет 4.1 года, максимальное значение бездисконтного срока окупаемости – 4.9 года. Установка двух СК в пределах пятилетнего горизонта планирования не окупается, что связано с величиной капитальных затрат.
2. При горизонте планирования 10 лет установка из одного и из двух СК окупается. В зависимости от темпа роста тарифа на электрическую энергию минимальный бездисконтный срок окупаемости установки одного СК составляет 3 года, максимальное значение бездисконтного срока окупаемости составляет 4.6 года; минимальный бездисконтный срок окупаемости при установке двух СК составляет 4.1 года, а максимальное значение бездисконтного срока окупаемости – 6.6 лет.
3. Норма дисконтирования и инфляция оказывают влияние на реализацию мероприятий по энергообеспечению. Сочетание данных факторов при горизонтах планирования более 5 лет в современных условиях не может быть однозначно определено. При сочетаниях значений нормы дисконтирования и темпов инфляции, отличающихся от приведенных в исследовании, экономическая эффективность внедрения мероприятий по использованию энергосберегающих технологий будет отличаться от полученных результатов.
4. Предложенная методика технико-экономического обоснования применима для регионов с солнечной инсоляцией в том числе более 1 700 час/год, а также для горячего водоснабжения небольших перерабатывающих предприятий, культурно-туристических объектов. Для проведения данных исследований необходим анализ потребления ГВС возможными абонентами.
5. Для индивидуальных потребителей рекомендуется принимать решение исходя из минимальных значений (от 2 до 6 %) нормы дисконтирования и темпов инфляции на электрическую энергию.

#### Библиографический список

1. Формирование индивидуальных жилых домов повышенной комфортности с применением энергосберегающих технологий / И. А. Дегтев, Ю. В. Денисова, М. Ю. Захарова, Г. Б. Бабаева. – Текст : непосредственный // Университетская наука. – 2022. – № 2 (14). – С. 39–42.
2. Горшков, А. С. Технология и организация строительства здания с нулевым потреблением энергии / А. С. Горшков, Д. В. Дерунов, В. В. Завгородний. – Текст : непосредственный // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2013. – № 3 (8). – С. 12–23.
3. Силаков, В. Р. Система удаленного мониторинга работы системы солнечного теплоснабжения локального объекта / В. Р. Силаков, А. А. Баклин. – Текст : непосредственный // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – № 4 (29). – С. 87–92.
4. Пахомова, М. А. Малоэтажное строительство в России и за рубежом: обзор практик / М. А. Пахомова, А. Б. Храмцов. – DOI 10.31660/2782-232X-2022-3-20-31. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2022. – № 3 (101). – С. 20–31.
5. Елохов, А. Е. Особенности проектирования пассивного дома в России / А. Е. Елохов. – Текст : непосредственный // Вестник МГСУ. – 2009. – № 4. – С. 313–316.

6. Хужаев, П. С. Пассивная отопительная система жилого здания / П. С. Хужаев. – DOI 10.31660/2782-232X-2022-4-53-59. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2022. – № 4 (102). – С. 53–59.
7. Брызгалин, В. В. Использование пассивных систем солнечного отопления как элемента пассивного дома / В. В. Брызгалин, А. К. Соловьев. – DOI 10.22227/1997-0935.2018.4.472-481. – Текст : непосредственный // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13, № 4 (115). – С. 472–481.
8. Elsheniti, M. B. Thermal performance of a heat-pipe evacuated-tube solar collector at high inlet temperatures / M. B. Elsheniti, A. Kotb, O. Elsamni. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2019.03.106. – Текст : непосредственный // Applied Thermal Engineering. – 2019. – Vol. 154. – P. 315–325.
9. Al-Zoubi, H. Design and feasibility study of an on-grid photovoltaic system for green electrification of hotels: a case study of Cedars hotel in Jordan / H. Al-Zoubi, Ya. Al-Khasawneh, W. Omar. – DOI 10.1007/s40095-021-00406-z. – Текст : непосредственный // International Journal of Energy and Environmental Engineering. – 2021. – Vol. 12, No. 4. – P. 611–626.
10. Akash, B. A. Energy analysis of Jordan's urban residential sector / B. A. Akash, M. S. Mohsen. – Текст : непосредственный // Energy. – 1999. – Vol. 24, No. 9. – P. 823–831.
11. Akinoglu, B. G. Solar domestic water heating in Turkey / B. G. Akinoglu, A. M. Shariah, A. Ecevit. – Текст : непосредственный // Energy. – 1999. – Vol. 24, No. 5. – P. 363–374.
12. Моделирование инсоляции на горизонтальную поверхность для расчета почасовых значений солнечной радиации / Н. А. Цветков, Ю. О. Кривошеин, А. В. Толстых, А. Н. Хуторной. – DOI 10.32683/0536-1052-2019-726-6-81-92. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2019. – № 6 (726). – С. 81–92.
13. Китайцева, Е. Х. Информационная обеспеченность математического моделирования работы систем солнечного теплоснабжения / Е. Х. Китайцева, Д. А. Константинова. – DOI 10.22227/1997-0935.2017.6.687-691. – Текст : непосредственный // Вестник МГСУ. – 2017. – Т. 12, № 6 (105). – С. 687–691.
14. Определение величины потока прямого солнечного излучения, направленного на горизонтальную поверхность / А. А. Мерсчиев, Р. А. Шепс, Д. В. Лобанов, А. В. Шашин. – Текст : непосредственный // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 4 (45). – С. 137–143.
15. Использование фотоэлектрических водонагревателей в условиях жаркого климата / С. Е. Фрид, Н. В. Лисицкая, А. Б. Тарасенко [и др.]. – DOI 10.5281/zenodo.4018982. – Текст : непосредственный // Проблемы региональной энергетики. – 2020. – № 3 (47). – С. 92–100.
16. Falih, H. Techno-economic assessment of a hybrid connected PV solar system / H. Falih, A. J. Hamed, A. H. N. Khalifa. – DOI 10.1007/s44189-022-00003-7. – Текст : непосредственный // International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration. – 2022. – Vol. 30, No. 1. – P. 1–15.
17. Лесникова, К. П. Солнечные водогрейные установки как альтернативный способ автономного горячего водоснабжения и отопления / К. П. Лесникова, А. К. Сокольский. – Текст : непосредственный // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте : Сборник статей VII Всероссийской научно-технической конференции для молодых ученых и студентов с международным участием, Пенза, 16–17 марта 2021 года. – Пенза : Пензенский государственный аграрный университет, 2021. – С. 144–150.

## References

1. Degtev, I. A., Denisova, Yu. V., Zakharova, & M. Yu., Babaeva, G. B. (2022). Formation of individual residential houses of increased comfort with the use of energy-saving technologies. *University Science*, 2(14), pp. 39-42. (In Russian).
2. Gorshkov, A. S., Dergunov, D. V., & Zavgorodny, V. V. (2013). Technology and organization of the building with zero energy consumption. *Construction of Unique Buildings and Structures*, 3(8), pp. 12-23. (In Russian).
3. Silakov, V. R., & Baklin, A. A. (2016). Sistema udalennogo monitoringa raboty sistem solnechnogo teplosnabzheniya lokal'nogo ob'ekta. *Regional Architecture and Construction*, 4(29), pp. 87-92. (In Russian).
4. Pakhomova, M. A., & Khramtsov, A. B. (2022). Low-rise construction in Russia and abroad: a review of practices. *Architecture, Construction, Transport*, (3(101)), pp. 20-31. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2022-3-20-31.
5. Elokhov, A. E. (2009). Osobennosti proektirovaniya passivnogo doma v Rossii. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*, (4), pp. 313-316. (In Russian).
6. Khujaev, P. S. (2022). Passive heating system of a residential building. *Architecture, Construction, Transport*, (4(102)), pp. 53-59. (In English). DOI 10.31660/2782-232X-2022-4-53-59.

7. Bryzgalin, V. V., & Solov'ev, A. K. (2018). The use of passive solar heating systems as part of the passive house. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*, 13-4(115), pp. 472-481. (In Russian). DOI 10.22227/1997-0935.2018.4.472-481.
8. Elsheniti, M. B., Kotb, A., & Elsamni, O. (2019). Thermal performance of a heat-pipe evacuated-tube solar collector at high inlet temperatures. *Applied Thermal Engineering*, 154, pp. 315-325. (In English). DOI 10.1016/j.applthermaleng.2019.03.106.
9. Al-Zoubi, H., Al-Khasawneh, Ya., & Omar, W. (2021). Design and feasibility study of an on-grid photovoltaic system for green electrification of hotels: a case study of Cedars hotel in Jordan. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 12(4), pp. 611-626. (In English). DOI 10.1007/s40095-021-00406-z.
10. Akash, B. A., & Mohsen, M. S. (1999). Energy analysis of Jordan's urban residential sector. *Energy*, 24 (9), pp. 823-831. (In English).
11. Akinoglu, B. G., Shariah, A. M., & Ecevit, A. (1999). Solar domestic water heating in Turkey. *Energy*, 24(5), pp. 363-374. (In English).
12. Tsvetkov, N. A., Krivoshein, Yu. O., Tolstykh, A. V., & Khutornoy, A. N. (2019). Modeling insolation on horizontal surface for calculation of half rates of solar radiation. *News of Higher Educational Institutions. Construction*, 6(726), pp. 81-92. (In Russian). DOI 10.32683/0536-1052-2019-726-6-81-92.
13. Kitaytseva, E. Kh., & Konstantinova, D. A. (2017). Information supply for solar thermal systems mathematical modeling. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*, Vol. 12, 6(105), pp. 687-691. (In Russian).
14. Mershiey, A. A., Sheps, R. A., Lobanov, D. V.1, & Shashin, A. V. (2020). Determination of the amount of direct solar radiation flux directed at horizontal surface. *Regional Architecture and Engineering*, 4(45), pp. 137-143. (In Russian).
15. Frid, S. E., Lisitskaya, N. V., Tarasenko, A. B., Frolova, N. D., & Suleimanov, M. Zh. (2020). Photoelectric water heaters use in hot climate conditions. *Problems of the Regional Energetics*, 3(47), 92-100. (In Russian). DOI 10.5281/zenodo.4018982.
16. Falih, H., Hamed, A. J., & Khalifa, A. H. N. (2022). Techno-economic assessment of a hybrid connected PV solar system. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, 30(1), pp. 1-15. (In English). DOI 10.1007/s44189-022-00003-7.
17. Lesnikova, K. P., & Sokolskii, A. K. (2021). Solar heating systems as an alternative method for autonomous hot water supply and heating. *Innovatsii tekhnicheskikh resheniy v mashinostroenii i transporte: Sbornik statey VII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii dlya molodykh uchenykh i studentov s mezhdunarodnym uchastiem*, March, 16-17. Penza, Penza State Agrarian University Publ., pp. 144-150. (In Russian).

#### Сведения об авторах

Белоглазова Татьяна Николаевна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения, вентиляции и водоснабжения, водоотведения, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: tabeloglazova@yandex.ru. ORCID 0000-0002-8221-0938

Романова Татьяна Николаевна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения, вентиляции и водоснабжения, водоотведения, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: botinkin@yandex.ru. ORCID 0000-0002-4430-1978

#### Information about the authors

Tatyana N. Beloglazova, Cand. Sc. in Engineering, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Heat and Gas Supply, Ventilation and Water Supply, and Drainage, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: tabeloglazova@yandex.ru. ORCID 0000-0002-8221-0938

Tatyana N. Romanova, Cand. Sc. in Engineering, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Heat and Gas Supply, Ventilation and Water Supply, and Drainage, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: botinkin@yandex.ru. ORCID 0000-0002-4430-1978