

Применение вакуумных солнечных коллекторов для отопления

Рецензия эксперта на статью получена
16.01.2023 [The expert review of the article
was received on January 16, 2023]

Введение

Декарбонизация энергетического сектора является одним из важнейших шагов на пути к ограничению роста глобальной температуры до уровня ниже 2°C в соответствии с целями Парижского соглашения по климату 2015 года [1]. Спрос на энергию резко возрастает в результате быстрого роста населения. Эксплуатация систем отопления, в которых преимущественно используются уголь и газ, приводит к сильному загрязнению окружающей среды, низкой эффективности сгорания и высоким выбросам углерода [2]. Повышение энергоэффективности должно снизить потребление энергии и затраты на отопление. Органы власти должны создавать условия для внедрения экологических энергосберегающих технологий, подходящих для климатических условий конкретного региона, и активно пропагандировать их [3]. Солнечная энергия является наиболее освоенным и распространённым возобновляемым источником энергии в странах всего мира благодаря своим преимуществам: она неиссякаемая, экологически безопасная и не загрязняет окружающую среду [4].

Небольшая часть энергии используется в природе в виде солнечного света и фотосинтеза, часть отражается обратно, а остальное поглощается поверхностью на планете. Поскольку солнечная радиация доступна только днём, имеет смысл собирать солнечную энергию и эффективно использовать её для получения электричества, тепла и охлаждения [5]. Для использования солнечная энергия



преобразуется в два основных вида: электрическую и тепловую энергию [6]. Цель работы — проанализировать влияние выработки тепловой энергии вакуумными коллекторами.

Сравнение двух солнечных систем подтверждает, что солнечный коллектор с вакуумной трубкой имеет гораздо лучшую производительность солнечной энергии, чем солнечный коллектор с плоской пластиной [7]. Плоские пластинчатые коллекторы имеют сравнительно низкую эффективность и температуру на выходе. Основными недостатками плоских солнечных коллекторов являются конвективные потери тепла через поверхность стекла и отсутствие слежения за солнцем, а также зависимость от климатических условий и эрозия материала из-за конденсата.

За последние годы вакуумные трубчатые коллекторы обогнали рынок плоских коллекторов благодаря развитию недорогой технологии напыления для производства вакуумных трубок из двойного стекла. Такие характеристики, как высокая производительность, устойчивость к коррозии и контролируемая рабочая температура являются основными преимуществами солнечных коллекторов с вакуумной трубкой [8].

УДК 697.7. Научная специальность: 2.1.3 (05.23.03).

Применение вакуумных солнечных коллекторов для отопления

А. Ю. Арсентьев, аспирант; **А. Г. Рымаров**, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции, [Московский государственный строительный университет \(НИУ МГСУ\)](#)

Возобновляемые источники энергии в последние годы привлекли особое внимание исследователей по всему миру. Постоянно публикуются исследования, в которых основное внимание уделяется оптимальной работе энергосистем на основе возобновляемых источников энергии в конкретном регионе. Переход систем, в которых доминируют значительное выделение количество CO_2 в процессе сжигания ископаемого топлива, может быть достигнут путём интеграции возобновляемых источников энергии. Солнечная энергия — это свободно доступный, безопасный, чистый и богатый источник энергии. Солнечные тепловые коллекторы — это хорошо известный способ использования солнечной энергии для удовлетворения растущего спроса на энергию и минимизации выбросов парниковых газов. Существует два типа технологий использования солнечной энергии: солнечная тепловая и фотоэлектрическая. Среди множества применений солнечной энергии отопление помещений потребляет значительное количество энергии. Среди большого выбора тепловых коллекторов, вакуумный трубчатый коллектор обладает наибольшей эффективностью. В этом документе рассматривается применение вакуумного трубчатого коллектора для частного жилого дома в Москве. При использовании солнечных коллекторов в октябре и в марте выработка тепловой энергии будет полностью покрывать пиковые нагрузки на отопление жилого дома.

Ключевые слова: солнечный коллектор, вакуумный коллектор, возобновляемая энергетика, гелиоустановка.

UDC 697.7. The number of scientific specialty: 2.1.3 (05.23.03).

The use of vacuum solar collectors for heating

A. Yu. Arsenteyev, postgraduate student; **A. G. Rymarov**, PhD, Associate Professor, Head of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, [National Research Moscow State University of Civil Engineering \(NRU MGSU\)](#)

Renewable energy sources have attracted particular attention from researchers around the world in recent years. Studies have been continuously published that focus on the optimal operation of renewable energy systems in a particular region. The transition of systems dominated by significant CO_2 release in the fossil fuel combustion process can be achieved by integrating renewable energy sources. Solar energy is a freely available, safe, clean and abundant energy source. Solar thermal collectors are a well-known way of using solar energy to meet the growing demand for energy and to minimize greenhouse gas emissions. There are two types of solar energy technologies: solar thermal and photovoltaic. Among the many applications of solar energy, space heating consumes a significant amount of energy. Among the large choice of thermal collectors, the vacuum tube collector has the greatest efficiency. This paper considers the application of a vacuum tube collector for a private residential building in the Moscow region. When using solar collectors in October and March, the heat production will fully cover the peak heating loads of the dwelling.

Key words: solar collector, vacuum collector, renewable energy, solar station.

Преимущество трубчатых солнечных коллекторов в том, что они меньше зависят от направления солнечного света, в то время как плоские пластины чрезмерно отражают плохо направленный солнечный свет. Солнечные тепловые коллекторы — это компоненты, существующие для сбора солнечного излучения, преобразования его в тепловую энергию и передачи её рабочей жидкости. Поэтому солнечные тепловые коллекторы являются основным и наиболее важным компонентом солнечных тепловых систем.

Общая солнечная радиация в горизонтальной плоскости без облаков в течение отопительного периода значительно уменьшается с увеличением широты, в то время как общая солнечная радиация в вертикальной плоскости изменяется в зависимости от азимута, широты и времени года. Фактическое значение солнечной радиации невелико, поскольку зависит от фактической облачности и прозрачности атмосферы в густонаселённых районах, а это означает, что продолжительность светового дня в отопительный период сокращается примерно в два раза и увеличивается потребление электроэнергии для внутреннего и наружного освещения [9].

Материалы и методы

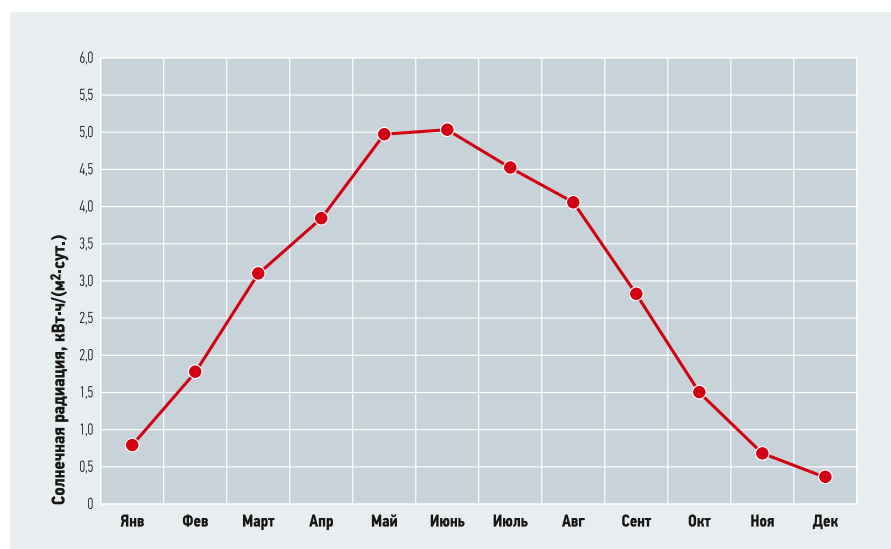
Метод, использованный в данном исследовании, является описательным методом, включающим сбор и анализ данных о интенсивности солнечной радиации (прямая солнечная радиация), полученных с сайта World Solar Atlas. Предлагается изучить возможность использования солнечных коллекторов в системах отопления в Москве. Расчёты основаны на данных из Москвы, Центрального федерального округа (долгота $37^{\circ}61'$, широта $55^{\circ}75'$). Значение солнечной радиации принимается из World Solar Atlas. В этой статье рассматриваются вакуумные трубчатые коллекторы, в частности, в контексте отопления частного жилого дома. Средний годовой температурный показатель в этом месте составляет $5,8^{\circ}\text{C}$, а среднегодовое значение прямого нормального облучения — $1019,4 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$.

Вакуумная трубка состоит из двух концентрических стеклянных трубок, запаянных с обоих концов и покрытых на внутренней трубке солнечным селективным покрытием. Вакуумные трубчатые солнечные коллекторы обеспечивают высокую эффективность благодаря своей трубчатой структуре, которая позволяет постоянно отслеживать солнечный луч, уменьшает площади тепловых потерь, а вакуум между двойными стёклами

Общая солнечная радиация в горизонтальной плоскости без облаков в течение отопительного периода значительно уменьшается с увеличением широты, в то время как общая солнечная радиация в вертикальной плоскости изменяется в зависимости от азимута, широты и времени года

значительно снижает конвективные потери тепла [10]. Солнечные селективные покрытия под воздействием солнца поглощают солнечную энергию и передают её тепловым трубам, установленным во внутренней трубе. Как внутренняя, так и внешняя трубы обладают минимальными отражающими свойствами.

жидкость достигает нижней части трубы и нагревается, её плотность уменьшается, а горячая жидкость течёт вверх, чтобы попасть в накопительный бак. Жидкость на конце трубы меняет своё направление, там образуется нулевое значение скорости, что называется застойной зоной, что приводит к уменьшению скорости теплопередачи жидкости внутри трубки [11]. Коллекторы с вакуумными трубками из тепловых труб обеспечивают подачу жидкости при более высоких температурах и эффективны при плохих погодных условиях [12]. Солнечные коллекторы с вакуумной трубкой могут собирать как прямое, так и рассеянное излучение. Обслуживание солнечных коллекторов с вакуумной трубкой является простым и недорогим. Если трубки повреждены



■ Рис. 1. Солнечная радиация для Москвы

Для создания вакуума две трубки соединяются в верхней части, чтобы откачать имеющийся воздух. Коллекторы вакуумных трубок состоят из нескольких труб, связанных с сосудом.

Каждая трубка содержит медную тепловую трубку, заполненную рабочей жидкостью. Жидкость в тепловой трубе имеет низкую температуру кипения, поэтому поднимается к коллекторной части тепловой трубы при нагревании солнечным излучением. После того, как холодная

или сломаны, система не перестанет работать, коллектор всё равно будет работать с меньшей эффективностью. В случае вакуумных коллекторов повреждённые трубки можно заменить без отключения всей системы, в то время как в случае плоских пластинчатых коллекторов для замены коллектора необходимо отключить всю систему.

На рис. 1 показана солнечная радиация для Москвы, максимальная радиация в июне на 1 м^2 составила $5,039 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ в сутки, а минимальная радиация в декабре составила $0,354 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ в сутки.

Вакуумные трубчатые солнечные коллекторы являются развитой технологией в стране, поскольку они могут использоваться для широкого диапазона средних и высоких температур, в зависимости от требований. Для достижения максимальной эффективности солнечные коллекторы следует устанавливать под углом 38° , обращённым на юг.



На рис. 2 показан солнечный коллектор, который может поглощать до 80 % солнечной энергии в соответствии с методом, описанным в [13]. Было определено количество энергии, которое может быть поглощено вакуумным солнечным коллектором и преобразовано в тепло.

Площадь поглощения вакуумной трубки диаметром 58 мм и длиной 1800 мм составляет 0,08 м². Характеристики вакуумного солнечного коллектора SCV-30-1800-58 с термотрубкой: коэффициент поглощения более 0,94 %, коэффициент излучения менее 0,06 %, прозрачность

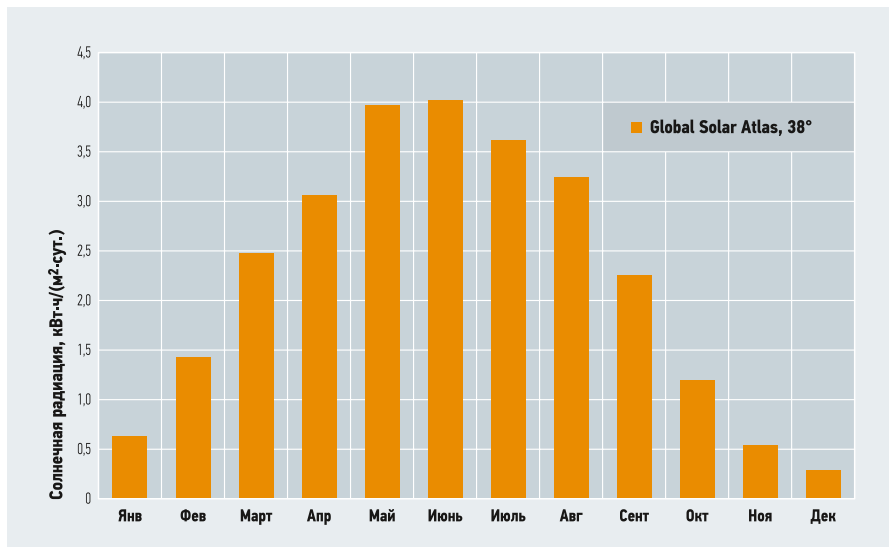


Рис. 2. Энергия поглощения солнечного излучения вакуумными трубками в Москве

внешней трубки — 0,95. Вакуумные коллекторы с термотрубкой являются наиболее технологически продвинутым типом коллекторов в настоящее время и обладают лучшей производительностью в холодную погоду [12]. Отопительный период длится с октября по апрель.

Базовый жилой дом был разработан для использования в качестве отправной точки для сравнительных исследований энергопотребления. Габаритные размеры дома в базовом варианте — 19,8 × 12,75 м, двухэтажное здание с фасадной конструкцией, высота пола — 3,3 м, соотношение окон к стенам 30 %. Типовые проекты ограждающих конструкций были разработаны на основе преобладающих архитектурных практик.

Чтобы определить количество тепловой энергии, необходимой для отопления, определяется коэффициент теплопередачи стены. Например, потеря тепла является ключевым фактором при проектировании, поэтому такие стены и крыши, как правило, имеют достаточную теплоизоляцию: $k_{нс} = 0,33$ Вт/(м²·°C), $k_{кр} = 0,24$ Вт/(м²·°C), $k_{ок} = 1,96$ Вт/(м²·°C). Для сравнительных энергетических исследований

были приняты одни и те же внутренние нагрузки, внутренние проектные условия и базовые системы ОВиК с соответствующими проектными данными.

Необходимый объем потребления тепла для отопления жилого дома

табл. 1

Наименование	Январь	Февраль	Март	Апрель	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Среднее за год
Теплопотери, кВт	37,061	37,549	34,261	15,235	16,777	21,299	38,693	28,70
Наружная температура воздуха, °C	-19,225	-19,7	-16,5	2,013	0,513	-3,888	-20,813	-11,09



Теплопотери через ограждающие конструкции определяются по формуле:

$$Q_{огр} = kS(t_b - t_n)n(1 + \sum \beta), \quad (1)$$

где k — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°C); S — площадь ограждающих конструкций, м²; t_b — внутренняя температура воздуха в помещении, °C; t_n — наружная температура воздуха, °C; n — коэффициент положения ограждения; β — сумма добавочных теплопотерь через ограждения; Q_{air} — расход теплоты на нагревание инфильтрующегося воздуха, $Q_{air} = 8073,34$ Вт.

Теплопотери через ограждающие конструкции в декабре месяце составят $Q_{огр} = 30\,616,85$ Вт.

Общие теплопотери в декабре составят 38 690,2 Вт.

В табл. 1 показано количество тепловой энергии, необходимой в течение отопительного периода. Зная величину необходимой тепловой энергии, определяем количество устанавливаемых труб.

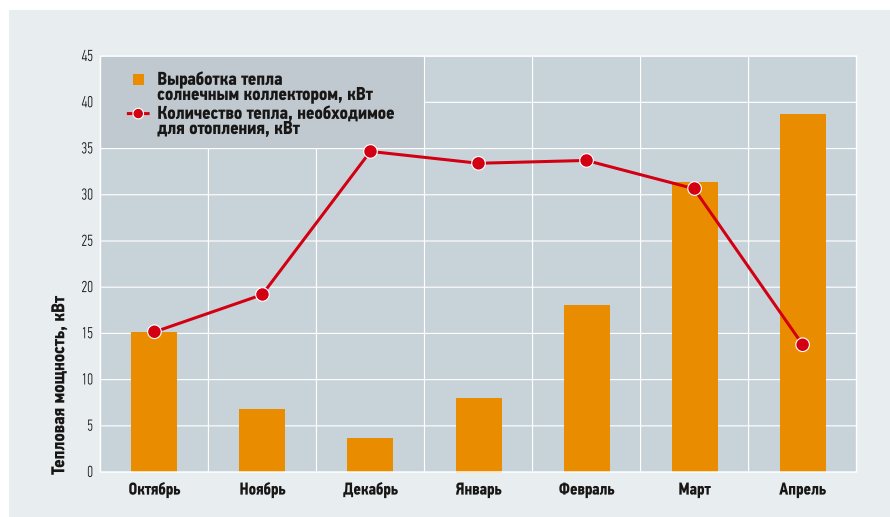


Рис. 3. График тепловой энергии

Количество трубок может значительно варьироваться в зависимости от отопительной нагрузки и энергии, получаемой от солнечного коллектора. Большое количество трубок оказывает негативное влияние летом, так как затрудняет использование дополнительного тепла. К расчёту принимаем 175 трубок в составе коллекторов.

На рис. 3 показана тепловая мощность солнечного коллектора и количество тепла, необходимое для отопления.

Солнечная энергия могут быть конкурентоспособными по стоимости в России по сравнению с традиционной генерацией даже при текущей высокой стоимости [14].

Заключение

В жилом секторе солнечные коллекторы с вакуумной трубкой доказали свой большой потенциал. Применение вакуумных солнечных коллекторов может снизить расходы на отопление. В ходе проведённых исследований было подтверждено, что вакуумные солнечные коллекторы являются наиболее производительными и эффективными по сравнению с другими типами солнечных коллекторов [15]. Для снабжения системы отопления требуется группа солнечных коллекторов об-



щей мощностью 200,87 кВт. При установке солнечного коллектора под углом 38° необходимое количество вакуумных трубок для отопления составит 175 шт.

Из рис. 3 можно сделать вывод, что в октябре и в марте выработка тепловой энергии солнечным коллектором будет полностью покрывать пиковые нагрузки.

Трубки вакуумного солнечного коллектора отличаются тем, что прозрачны снаружи и имеют высокоселективное покрытие внутри для эффективного улавливания солнечной энергии

В ноябре нагрузка будет покрываться на 35 %, в декабре — на 10 %, в январе — на 24 %, в феврале — на 20 % от солнечных коллекторов.

Солнечные коллекторы с вакуумной трубкой настоятельно рекомендуются для использования при высоких температурах, поскольку они легко достигают высоких температур и сохраняют тепло даже в холодном климате. В холодном климате солнечные коллекторы с вакуумной трубкой очень экономичны и обеспечивают превосходную эффективность благодаря эффекту защиты от замерзания.

Вакуумные солнечные коллекторы состоят из тепловых трубок и по форме напоминают термос. Трубки прозрачны снаружи и имеют высокоселективное покрытие внутри для эффективного улавливания солнечной энергии [16]. Благодаря цилиндрической форме трубки солнечный свет попадает на поглощающую поверхность перпендикулярно оси трубки, а все остальные лучи, не перпендикулярные оси трубки, отражаются. Вакуумными солнечными коллекторами за год возможно выработать 134,83 кВт. При установке вакуумных солнечных коллекторов экономия энергоресурсов в натуральном выражении составит 67 %. ●

1. Fragkos P. et al. Energy system transitions and low-carbon pathways in Australia, Brazil, Canada, China, EU-28, India, Indonesia, Japan, Republic of Korea, Russia and the United States. *Energy*. 2021. Vol. 216.
2. Mahmoud M. et al. The impacts of different heating systems on the environment: A review. *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 766. Issue 25.
3. Zhang Z. et al. Clean heating during winter season in Northern China: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 149.
4. Shahsavari A., Akbari M. Potential of solar energy in developing countries for reducing energy-related emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 90.
5. Sabiha M.A. et al. Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 51.
6. Бордан Д.Ф., Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Олейников А.М., Гхашиш М. Потенциал развития тепловой солнечной энергетики для нужд ЖКХ // *Энергетические установки и технологии*, 2021. №1. С. 46–52.
7. Chopra K. et al. Global advancement on experimental and thermal analysis of evacuated tube collector with and without heat pipe systems and possible applications. *Applied Energy*. 2018. Vol. 228.
8. Li C. et al. Stearic acid/expanded graphite as a composite phase change thermal energy storage material for tankless solar water heater. *Sustainable Cities and Society*. 2019. Vol. 44.
9. Крупнов Б.А. К вопросу о целесообразности использования энергии солнца и ветра // *Журнал СОК*. 2022. №5. С. 68–69.
10. Olfian H., Ajarostaghi S.S.M., Ebrahimnataj M. Development on evacuated tube solar collectors: A review of the last decade results of using nanofluids. *Solar Energy*. 2020. Vol. 211.
11. Tabarhoseini S.M., Sheikholeslami M. Entropy generation and thermal analysis of nanofluid flow inside the evacuated tube solar collector. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. Issue 1.
12. Olczak P., Matuszewska D., Zabaglo J. The comparison of solar energy gaining effectiveness between flat plate collectors and evacuated tube collectors with heat pipe: case study. *Energies*. 2020. Vol. 13. Issue 7.
13. Пособие по проектированию и расчёту гелиосистем RUCSELF [Элект. текст]. Компания RUCSELF.PRO. Режим доступа: rucelf.pro. Дата обращ.: 10.11.2022.
14. Lanshina T.A. et al. The slow expansion of renewable energy in Russia: Competitiveness and regulation issues. *Energy Policy*. 2018. Vol. 120.
15. Слесаренко И.В. Исследование и испытания вакуумных солнечных коллекторов в системах теплоснабжения // *Фундаментальные исследования*, 2016. №2–3. С. 509–514.
16. Алмаев А.Ю., Лукшин И.А. Преимущества и недостатки плоских и вакуумных коллекторов солнечной энергии // *Вестник Княгининского университета (НГПИЭИ)*, 2015. №6. С. 16–20.

References — see page 109.

The use of vacuum solar collectors for heating. Pp. 92–95.

Arkady Yu. Arsent'yev, postgraduate student; **Andrey G. Rymarov**, PhD, Associate Professor, Head of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, [National Research Moscow State University of Civil Engineering \(NRU MGSU\)](#)

1. P. Fragkos et al. Energy system transitions and low-carbon pathways in Australia, Brazil, Canada, China, EU-28, India, Indonesia, Japan, Republic of Korea, Russia and the United States. *Energy*. 2021. Vol. 216.
2. M. Mahmoud et al. The impacts of different heating systems on the environment: A review. *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 766. Issue 25.
3. Z. Zhang et al. Clean heating during winter season in Northern China: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 149.
4. A. Shahsavari, M. Akbari. Potential of solar energy in developing countries for reducing energy-related emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 90.
5. M.A. Sabiha et al. Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 51.
6. D.F. Bordan, V.V. Kuvshinov, E.G. Kakushina, A.M. Olejnikov, M. Ghashim. *Potencial razvitiya teplovoj solnechnoy jenergetiki dlja nuzhd kommunalnogo hozjajstva* [Potential for the development of thermal solar energy for the needs of public utilities]. *Jenergeticheskie ustanovki i tehnologii* ["Power installations and technologies" Magazine]. 2021. No. 1. Pp. 46–52. [In Russian]
7. K. Chopra et al. Global advancement on experimental and thermal analysis of evacuated tube collector with and without heat pipe systems and possible applications. *Applied Energy*. 2018. Vol. 228.
8. C. Li et al. Stearic acid/expanded graphite as a composite phase change thermal energy storage material for tankless solar water heater. *Sustainable Cities and Society*. 2019. Vol. 44.
9. B.A. Krupnov. *K voprosu o celesoobraznosti ispol'zovaniya jenerгии solnca i vetra* [To the question of the expediency of using solar and wind energy]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2022. No. 5. Pp. 68–69. [In Russian]
10. H. Olfian, S.S.M. Ajarostaghi, M. Ebrahimnataj. Development on evacuated tube solar collectors: A review of the last decade results of using nanofluids. *Solar Energy*. 2020. Vol. 211.
11. S.M. Tabarhoseini, M. Sheikholeslami. Entropy generation and thermal analysis of nanofluid flow inside the evacuated tube solar collector. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. Issue 1.
12. P. Olczak, D. Matuszewska, J. Zabaglo. The comparison of solar energy gaining effectiveness between flat plate collectors and evacuated tube collectors with heat pipe: case study. *Energies*. 2020. Vol. 13. Issue 7.
13. *Posobie po proektirovaniyu i raschetu geliosistem RUCELF* [Handbook for the design and calculation of RUCELF solar systems]. Web-source: geo-comfort.ru. Access date: November 10, 2022. [In Russian]
14. T.A. Lanshina et al. The slow expansion of renewable energy in Russia: Competitiveness and regulation issues. *Energy Policy*. 2018. Vol. 120.
15. I.V. Slesarenko. *Issledovanie i ispytaniya vakuumnykh solnechnykh kollektorov v sistemah teplosnabzheniya* [Research and testing of vacuum solar collectors in heat supply systems]. *Fundamentalnye issledovaniya* ["Basic research" Magazine]. 2016. No. 2–3. Pp. 509–514. [In Russian]
16. A.Ju. Almaev, I.A. Lukshin. *Preimushhestva i nedostatki ploskikh i vakuumnykh kollektorov solnechnoy jenerгии* [Advantages and disadvantages of flat and vacuum solar collectors]. *Vestnik NGIIEI* [Bulletin of the Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University (Bulletin NGIEI)]. 2015. No. 6. Pp. 16–20. [In Russian]