

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И
ОСВЕЩЕНИЕ / HEATING, VENTILATION, AIR CONDITIONING, GAS SUPPLY AND LIGHTING

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.8>

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛОСКОГО СОЛНЕЧНОГО КОЛЛЕКТОРА

Научная статья

Щемелев Д.Ю.^{1,*}, Штым А.С.²

¹ORCID : 0000-0002-4080-8050;

^{1,2} Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (dimon.3645[at]gmail.com)

Аннотация

Энергосбережение входит в пять стратегических направлений приоритетного технологического развития РФ. Исследования и развитие технологий – это одно из важнейших направлений, способствующих энергосбережению, в соответствии с федеральным законом №261-ФЗ от 23 ноября 2009 года, который создает правовой, экономический и организационный механизм стимулирования энергосбережения и повышения энергетической эффективности, снижение капитальных и эксплуатационных затрат. Одним из перспективных направлений для решения такой проблемы по уменьшению потребления и рациональному использованию традиционных источников энергии является применение возобновляемой энергетики. Совокупность существующих потребностей населения и промышленности в тепловой энергии чрезвычайно важна. Это особенно важно для районов, удаленных от центральных систем теплоснабжения. В настоящее время запасы традиционного для этих целей ископаемого топлива ограничены. Этот фактор, а также глобальное увеличение энергопотребления требует изучения технологий применения возобновляемых источников энергии (в этой работе – солнечной), а также их внедрение в современные системы теплоснабжения.

Целью является определение эффективных способов повышения коэффициента полезного действия (далее КПД) солнечного коллектора (далее СК) и представить его новую конструкцию [6].

Задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели:

- проанализировать различные конструкции плоских СК;
- выбрать материалы, повышающие КПД солнечного коллектора;
- разработать технологию практической реализации новой конструкции плоского СК.

Ключевые слова: альтернативные источники энергии, солнечный коллектор, солнечное излучение, тепловая энергия, новая конструкция.

INCREASING THE EFFICIENCY OF A FLAT SOLAR COLLECTOR

Research article

Shchemelev D.Y.^{1,*}, Shtim A.S.²

¹ORCID : 0000-0002-4080-8050;

^{1,2} Far Federal Eastern University, Vladivostok, Russian Federation

* Corresponding author (dimon.3645[at]gmail.com)

Abstract

Energy saving is one of the five strategic areas of priority technological development of the Russian Federation. Research and technology development is one of the most important areas contributing to energy saving, in accordance with Federal Law No. 261-FZ of 23 November 2009, which creates a legal, economic and organizational mechanism to stimulate energy saving and efficiency, reducing capital and operating costs. One of the promising directions for solving such problem of reduction of consumption and rational use of traditional energy sources is application of renewable energy. The combined heat and power demand of the population and industry is extremely important. This is particularly critical for areas remote from district heating systems. At present, the reserves of traditional fossil fuels for these purposes are limited. This factor, as well as the global increase in energy consumption, calls for the study of renewable energy technologies (in this work, solar energy), as well as their introduction into modern heat supply systems.

The aim is to identify effective ways to increase the coefficient of efficiency of a solar collector (hereinafter "SC") and to present its new design [6].

The tasks that must be completed in order to achieve the objective:

- to analyse the different designs of flat SC;
- to select materials that increase the efficiency of the solar collector;
- to develop a technology for the practical implementation of a new flat SC design.

Keywords: alternative energy sources, solar collector, solar radiation, thermal energy, new design.

Введение

СК является основным оборудованием установки, преобразующим солнечное излучение в тепловую энергию. Наибольшее распространение получили плоские СК, достигшие хорошей эффективности, срока службы и стоимости.

За последние время было выпущено немало научных трудов, посвящённых исследованиям в области нетрадиционной энергетики. Анализ работ, представленных в [7], [8], [9], [11] показал, что схемы СК, а также установки с солнечными коллекторами требуют более подробного изучения. Однако некоторые авторы рассматривают

возможность повышения КПД не только оптимизируя процессы гибридных установок, но и путем конструктивного совершенствования СК.

Данное исследование достаточно актуально, так как предлагаемый солнечный коллектор может применяться в схемах теплоснабжения, как самостоятельный источник теплоты, а также в схемах гибридных установок совместно с тепловым насосом, обеспечивая микроклимат помещений не только теплотой, но и холодом. Эффективность, стабильность, эксплуатационные характеристики таких гибридных установок являются их основными преимуществами.

Основным элементом плоского СК является абсорбер (теплопоглотитель), изготавливаемый из металлов с высокой теплопроводностью – алюминий, сталь, медь, с расположенными под ним трубками для циркуляции теплоносителя. Над абсорбером расположена прозрачная изоляция из стекла или полимерного материала. Корпус СК, выполненный из алюминия, пластика или оцинкованного железа, качественно теплоизолированный внутри минеральной ватой [1].

Плоские СК работают по принципу парникового эффекта, который основан на том, что, падающее солнечное излучение почти полностью проходит через прозрачное покрытие, нагревая выше температуры окружающей среды теплоприемную поверхность и циркулирующий в трубках теплоноситель, который переносит тепловую энергию в аккумулирующий бак [2].

Преимущества: длительный срок эксплуатации; простота конструкции; надежность; высокая эффективность.

Недостаток: в холодный период года и в периоды низкой радиации наблюдается снижение КПД

Существует несколько способов повышения КПД солнечного коллектора.

Первый – использовать при изготовлении СК материалы с повышенными теплотехническими характеристиками:

1. Светопрозрачный слой – гелио-стекло, в котором за счет низкого содержания железа, светопрозрачность достигает 96-98%, но высокая стоимость этого материала повысит цену СК.

2. Лучепоглощающий лист – металлы с максимальными коэффициентами поглощения и теплопроводности, наиболее доступными являются медь (413 Вт/(м·К)) или алюминий (237 Вт/(м·К)) [3]. Экономически целесообразнее использовать алюминий, который дополнительно покрывают абсорбирующим слоем черной краски, повышающим его коэффициент поглощения излучения (0,90-0,92).

3. В качестве лучепоглощающего слоя используют специальное селективное покрытие (0,96), которым может быть тонкий слой оксида металлов: меди, черного хрома, других металлов или полупроводниковых материалов, способствующий максимально возможному поглощению солнечной энергии, попадающей на абсорбер и препятствуя обратному излучению, чего нельзя сказать о черной краске.

4. Необходим надежный контакт лучепоглощающего листа с трубками СК, для лучшей теплопроводности, оказывающей значительное влияние на рабочие характеристики. Между ними не должно быть воздушной прослойки, которая повышает сопротивление теплопередаче данного соединения [4].

5. Рабочие трубки СК, в которых циркулирует нагреваемая рабочая среда, следует выполнять из меди, обеспечивающей высокий коэффициент теплопередачи.

6. Для уменьшения потерь теплоты и отражения инфракрасного излучения от нижней части и боковых стенок СК можно использовать фольгированный утеплитель [5].

Второй способ – изменение конструкции СК с целью повышения его тепловых и гидродинамических характеристик.

Основные результаты и обсуждения

Основываясь на теоретических данных, изучении практической реализации и определив основные пути повышения эффективности работы СК была разработана его новая конструкция, запатентованная как полезная модель №2021116342, «относящаяся к гелиотехнике со средствами концентрации солнечной энергии, и может быть использована в системах теплоснабжения зданий различного назначения» [6].

В новом СК обеспечен максимальный путь движения теплоносителя внутри трубок при минимальном гидравлическом сопротивлении. Конструктивные особенности полезной модели СК решают следующие функциональные задачи (см. рис. 1, 2, 3):

1. «тепловоспринимающие трубки направлены по спирали в одной плоскости» спиралевидная форма трубок увеличила путь движения теплоносителя, а поскольку у спирали отсутствуют углы, то гидравлические потери будут меньше;

2. вход теплоносителя в трубки смещен к краю стенки корпуса, а выход теплоносителя расположен в центральной части корпуса, что позволяет более плотно разместить трубки внутри корпуса.

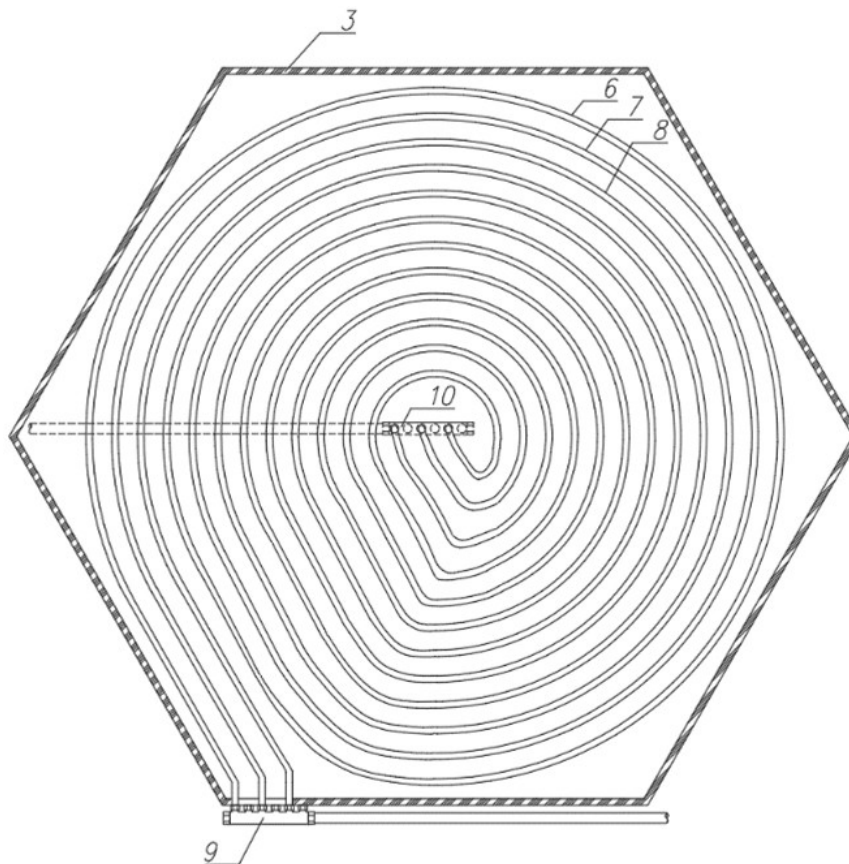


Рисунок 1 - Солнечный коллектор вид спереди:

3 – стенки корпуса; 6 – первая; 7 – вторая и 8 – третья теплопринимающие трубки; 9 – вход теплоносителя; 10 – выход теплоносителя

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.8.1>

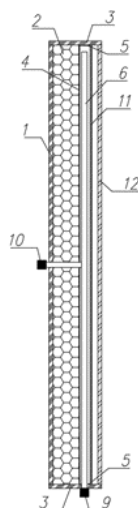


Рисунок 2 - Поперечный разрез СК:

1 – корпус; 2 – теплоизоляция; 3 – стенки корпуса; 4 и 5 – отражающие слои; 6 – первая; 9 – вход теплоносителя; 10 – выход теплоносителя; 11 – лучепоглощающий лист; 12 – светопрозрачный слой

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.8.2>

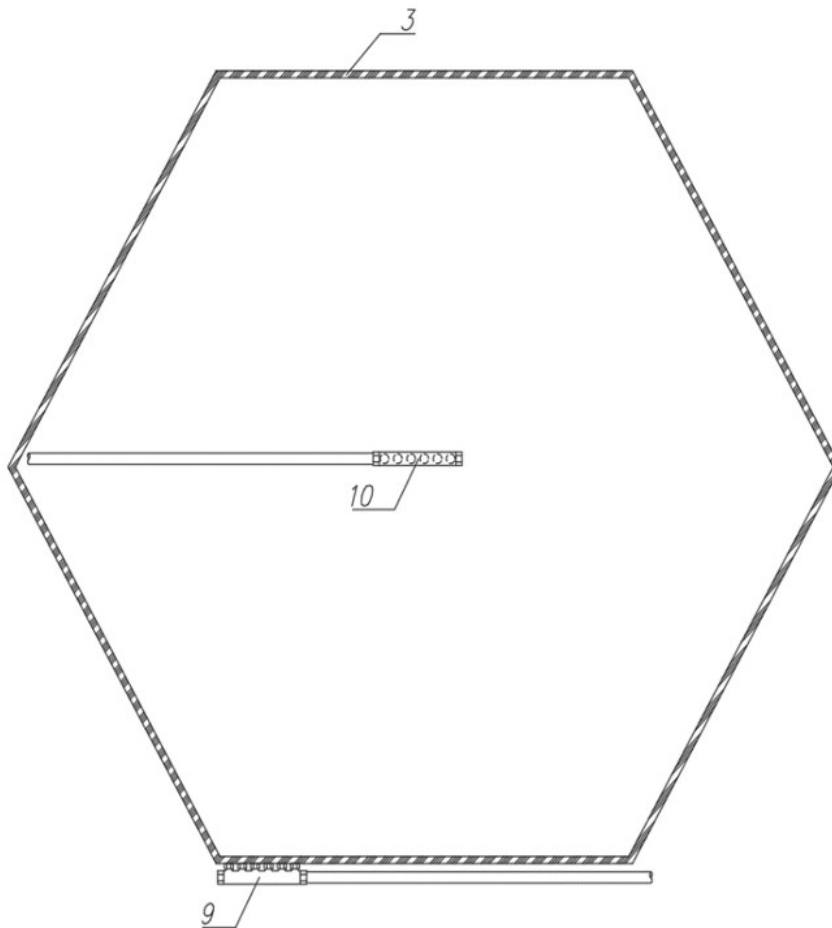


Рисунок 3 - Вид сзади СК:

3 – стенки корпуса; 9 – вход теплоносителя; 10 – выход теплоносителя

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.8.3>

На рисунках показаны основные элементы СК, предполагается выполнить образец в натуральных размерах, чтобы провести исследование его теплофизических характеристик, определить КПД, рассчитать размерный ряд, поэтому следует тщательно подобрать материалы, из которых будет создан СК и разработана технология изготовления этой конструкции. Корпус 1 предполагается выполнить из металла с антикоррозионным покрытием, торцы необходимо защитить уголком, закрепленным к металлическому листу. Теплоизоляция 2, расположенная в нижней части и на боковых стенках 3, состоит из минеральной ваты с отражающими слоями 4,5 из фольги.

В качестве теплоносителя используют незамерзающую жидкость – пропиленгликоль из-за его безопасности и экологичности.

Представленный СК работает следующим образом: теплоноситель подается в распределитель 9 и поступает в медные трубки 6-8. Лучистая солнечная энергия через светопрозрачный слой 12 попадает на лучепоглощающий лист 11, существенно снижающий потери теплоты. В процессе принудительной циркуляции теплоносителя по трубкам 6-8, он нагревается и выводится через выходной сборник 10, поступая в бак-аккумулятор горячей воды.

Гидравлическое сопротивление потоку жидкости во всех медных трубках СК будет одинаковым независимо от их длины, так как потоки этого теплообменника являются гидравлически параллельными.

Для проведения гидравлических расчетов в тепловоспринимающих трубках воспользуемся методом гидравлических характеристик сопротивления, уравнение 1:

$$\Delta P = S \cdot G^2 \quad (1)$$

где ΔP – потеря давления на гидравлическом участке, Па;

S – гидравлическая характеристика сопротивления участка, Па/(кг/ч)²;

G – часовой расход теплоносителя, кг/ч.

Так как потоки являются гидравлически параллельными, а потери давления на участках первой 6 (ΔP_1), второй 7 (ΔP_2) и третьей 8 (ΔP_3) тепловоспринимающих трубок равны между собой, то зависимость гидравлических потерь между трубками выражается уравнением 2 и если подставить уравнение 1, то получим уравнение 3:

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3 \quad (2)$$

$$S_1 \cdot G_1^2 = S_2 \cdot G_2^2 = S_3 \cdot G_3^2 \quad (3)$$

Гидравлическую характеристику сопротивления соответствующих участков труб вычисляем по формуле 4:

$$S = A \cdot (l \cdot \lambda/d + \sum \zeta) \quad (4)$$

где A – коэффициент, равный $2,7 \cdot 10^4$ для тепловоспринимающей трубки диаметром 10 мм, Па/(кг/ч²);

l – длина гидравлического участка трубопровода, м;

λ/d – отношение коэффициента сопротивления внутренней поверхности трубопровода к диаметру;

$\sum \zeta$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений на гидравлическом участке трубопровода.

Задавшись расходом в первой тепловоспринимающей трубке (G_1), можно рассчитать расходы теплоносителя в остальных тепловоспринимающих трубках по формуле 5, 6:

$$G_2 = \sqrt{(S_1 \cdot G_1^2)/S_2} \quad (5)$$

$$G_3 = \sqrt{(S_1 \cdot G_1^2)/S_3} \quad (6)$$

Результаты гидравлического расчета сведены в таблицу 1.

Таблица 1 - Гидравлическая характеристика сопротивления и расход на участке

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.8.4>

| Наименование величины | Трубка -1 | Трубка -2 | Трубка -3 |
|-------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| A , Па/(кг/ч ²) | $2,7 \cdot 10^4$ | $2,7 \cdot 10^4$ | $2,7 \cdot 10^4$ |
| l , м | 9,2 | 8,2 | 7,2 |
| λ/d | 3,6 | 3,6 | 3,6 |
| S , Па/(кг/ч) ² | 0,0098874 | 0,0089154 | 0,0079434 |
| G , кг/ч | 288 | 303,29 | 321,31 |
| ΔP , Па | 820 | 820 | 820 |

Данное техническое решение позволило разбить поток теплоносителя на три гидравлически параллельных участка, что в свою очередь снизило гидравлические потери по длине трубопровода и при этом увеличило время пребывания теплоносителя в трубках. Кроме того, появляется возможность повысить расход теплоносителя и скорость его движения при меньшей мощности насоса. Повышение расхода и скорости теплоносителя повысит коэффициент эффективности СК за счёт увеличения коэффициента теплоотдачи от трубы к жидкости.

Для сравнения рассмотрен «солнечный коллектор меандрообразной формы» (см. патент РФ № 112364, МПК F24J 2/24, опубликован 01.10.2012) [12]. Выполнен сравнительный анализ конструктивных особенностей данного и нового СК.

При этом материалы элементов, диаметр тепловоспринимающих трубок, и площадь поверхности корпуса были приняты одинаковыми, результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Сравнительный анализ конструктивных характеристик двух типов СК

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.8.5>

| Конструкционная характеристика, ед. измерения | Меандрообразный СК | Новый СК |
|--|--------------------|----------|
| Площадь апертуры, м ² | 1,099 | 1,098 |
| Площадь, занятая тепловоспринимающими трубками, м ² | 0,12 | 0,244 |
| Лучепоглощающая поверхность тепловоспринимающих трубок, м ² | 0,188 | 0,383 |
| Длина тепловоспринимающих трубок, м | 12 | 24,4 |
| Расстояние между осями тепловоспринимающих трубок, м | 0,03-0,1 | 0,04 |
| Диаметр тепловоспринимающих трубок, мм | 10 | 10 |

| | | |
|----------------------------------|------|-----|
| Суммарные потери давления, Па | 5906 | 820 |
|----------------------------------|------|-----|

На основании таблицы 2 можно сделать следующие выводы о достоинствах нового СК:

- 1 – в два раза больше площадь, занятая тепловоспринимающими трубками;
 - 2 – более чем в два раза больше лучепоглощающая поверхность тепловоспринимающих трубок;
 - 3 – в два раза больше длина тепловоспринимающих трубок.
- Эти достоинства показывают перспективу исследования и практического внедрения данной модели СК.

Заключение

В работе отмечено, что при шестиугольной форме корпуса и спиралеобразной компоновке труб увеличивается длина тепловоспринимающих труб, а также площадь, занятая тепловоспринимающими трубками и лучепоглощающая поверхность более чем в 2 раза. Отсутствие углов поворота трубок снижает их гидравлическое сопротивление, что также значительно сказывается на повышении общего КПД солнечного коллектора. В спиральном СК планируется использовать современные материалы теплоизоляции и светопрозрачного слоя, что также повысит его КПД. Шестиугольная форма корпуса и выходной распределитель теплоносителя, расположенный в центральной части корпуса, экономит место при размещении большого количества СК на ограниченной площади.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Лушин К.И., НИИСФ, Москва, Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.8.6>

Review

Lushin K., NIISF, Moscow, Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.8.6>

Список литературы / References

1. Харченко Н.М. Индивидуальные солнечные установки / Н.М. Харченко — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 208 с.
2. Голицын М.В. Альтернативные энергоносители / М.В. Голицын — М.: Наука, 2004. — 159 с.
3. Кныш Л.И. Метод учета тепловой проводимости абсорбера в плоском солнечном коллекторе. / Л.И. Кныш // International Scientific Journal Life and Ecology. — 2014. — 2.
4. Сулейманов М.Ж. Экспериментальное исследование теплотехнических характеристик солнечных коллекторов и водонагревательных установок дис. ...канд. null: 05.14.01 : защищена 2007-05-30 : утв. 2007-05-30 / М.Ж. Сулейманов — М.: 2007. — 130 с.
5. Goswami D.Y. Principles of Solar Engineering / D.Y. Goswami — NW: Broken Sound Parkway, 2015. — 790 p.
6. Пат. 2021116342 Russian Federation, МПК2021116342 RU 207 067 U1. Солнечный коллектор / Щемелев Д.Ю., Штым А.С., Журмилова И.А.; заявитель и патентообладатель Дальневосточный федеральный университет. — № 2021116342; заявл. 2021-06-07; опубл. 2023-01-12, — 11 с.
7. Туник А.А. Процессы теплопереноса и гидравлические режимы в плоском солнечном коллекторе с меандрообразными тепловоспринимающими трубками для систем отопления дис. ...канд. null: 05.23.03 : защищена 2018-02-28 : утв. 2018-02-28 / А.А. Туник — Иркутск: 2018. — 171 с.
8. Аунг К. Исследование эффективности использования энергокомплексов на основе солнечных и теплонаносных установок в региональной энергетике Мьянмы дис. ...д-ра null: 05.14.08 : защищена 2019-05-17 : утв. 2019-05-17 / К. Аунг — М.: 2019. — 163 с.
9. Батухтин А.Г. Комплексное совершенствование технологий тепловой и нетрадиционной энергетики для повышения эффективности систем централизованного теплоснабжения (на примере забайкальского края) дис. ...д-ра null: 05.14.01 : защищена 2022-06-07 : утв. 2022-06-07 / А.Г. Батухтин — Чита: 2022. — 338 с.
10. Филиппченкова Н.С. Разработка и исследование неследящих солнечных концентраторных модулей с жалюзийными гелиостатами дис. ...канд. null: 05.14.08 : защищена 2018-06-26 : утв. 2018-06-26 / Н.С. Филиппченкова — М.: 2018. — 174 с.
11. Шароварова Е.П. Солнечно-геотермальное энергоснабжение зданий с энергоэффективными фасадными конструкциями дис. ...канд. null: 05.14.08 : защищена 2021-12-16 : утв. 2021-12-16 / Е.П. Шароварова — Екатеринбург: 2021. — 135 с.
12. Пат. 201113048506 Russian Federation, МПК201113048506 RU 112 364 U1. Солнечный коллектор / Толстой М.Ю., Акинина Н.В., Туник А.А.; заявитель и патентообладатель Иркутский государственный технический университет. — № 201113048506; заявл. 2011-07-21; опубл. 2023-01-12, — 12 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Xarchenko N.M. Individual'ny'e solnechny'e ustanovki [Individual Solar Installations] / N.M. Xarchenko — М.: E'nergoatomizdat, 1991. — 208 p. [in Russian]
2. Golicyn M.V. Al'ternativny'e e'nergonositeli [Alternative Energy Carriers] / M.V. Golicyn — М.: Nauka, 2004. — 159 p. [in Russian]
3. Knysh L.I. Metod ucheta teplovoj provodimosti absorbera v ploskom solnechnom kollektore [Method for Taking into Account the Thermal Conductivity of the Absorber in a Flat Solar Collector]. / L.I. Knysh // International Scientific Journal Life and Ecology [International Scientific Journal Life and Ecology]. — 2014. — 2. [in Russian]

4. Sulejmanov M.Zh. E'ksperimental'noe issledovanie teplotexnicheskixarakteristik solnechny'x kollektorov i vodonagrevatel'ny'x ustanovok [Experimental Study of the Thermal Characteristics of Solar Collectors and Water Heating Plants] dis....of PhD in Engineering: 05.14.01 : defense of the thesis 2007-05-30 : approved 2007-05-30 / М.Ж. Сулейманов — М.: 2007. — 130 p. [in Russian]
5. Goswami D.Y. Principles of Solar Engineering / D.Y. Goswami — NW: Broken Sound Parkway, 2015. — 790 p.
6. Pat. 2021116342 Russian Federation, МПК2021116342 RU 207 067 U1. Solnechny'j kollektor [Solar Collector] / Щемелев Д.Ю., Штым А.С., Журмилова И.А.; the applicant and the patentee Far Eastern Federal University. — № 2021116342; appl. 2021-06-07; publ. 2023-01-12, — 11 p. [in Russian]
7. Tunik A.A. Processy' teplomassoperenosa i gadravlicheskie rezhimy' v ploskom solnechnom kollektore s meandroobrazny'mi teplovosprinimayushhimi trubkami dlya sistem otopleniya [Heat and Mass Transfer Processes and Hydraulic Modes in a Flat Solar Collector with Meander-shaped Heat-receiving Tubes for Heating Systems] dis....of PhD in Engineering: 05.23.03 : defense of the thesis 2018-02-28 : approved 2018-02-28 / А.А. Туник — Irkutsk: 2018. — 171 p. [in Russian]
8. Aung K. Issledovanie e'ffektivnosti ispol'zovaniya e'nergokompleksov na osnove solnechny'x i teplonosny'x ustanovok v regional'noj e'nergetike M'yanmy' [Study of the Effectiveness of the Use of Energy Complexes Based on Solar and Heat Pump Installations in the Regional Energy Sector of Myanmar] dis....of PhD in Engineering: 05.14.08 : defense of the thesis 2019-05-17 : approved 2019-05-17 / К. Аунг — М.: 2019. — 163 p. [in Russian]
9. Batuxtin A.G. Kompleksnoe sovershenstvovanie texnologij teplovoj i netradicijnoj e'nergetiki dlya pov'sheniya e'ffektivnosti sistem centralizovannogo teplosnabzheniya (na primere zabajkal'skogo kraja) [Comprehensive Improvement of Thermal and Non-traditional Energy Technologies to Improve the Efficiency of District Heating Systems (on the example of the Trans-Baikal Territory)] dis....of PhD in Engineering: 05.14.01 : defense of the thesis 2022-06-07 : approved 2022-06-07 / А.Г. Батухтин — Chita: 2022. — 338 p. [in Russian]
10. Filippchenkova N.S. Razrabotka i issledovanie nesledyashhix solnechny'x koncentratorny'x modulej s zhalyuzijny'mi geliostatami [Development and Research of Non-tracking Solar Concentrator Modules with Louvered Heliostats] dis....of PhD in Engineering: 05.14.08 : defense of the thesis 2018-06-26 : approved 2018-06-26 / Н.С. Филиппченкова — М.: 2018. — 174 p. [in Russian]
11. Sharovarova E.P. Solnechno-geotermal'noe e'nergosnabzhenie zdaniy s e'nergieffektivny'mi fasadny'mi konstrukcijami [Solar-geothermal Energy Supply of Buildings with Energy-efficient Facade Structures] dis....of PhD in Engineering: 05.14.08 : defense of the thesis 2021-12-16 : approved 2021-12-16 / Е.П. Шароварова — Ekaterinburg: 2021. — 135 p. [in Russian]
12. Pat. 201113048506 Russian Federation, МПК201113048506 RU 112 364 U1. Solnechny'j kollektor [Solar Collector] / Толстой М.Ю., Акинина Н.В., Туник А.А.; the applicant and the patentee Irkutsk State Technical University. — № 201113048506; appl. 2011-07-21; publ. 2023-01-12, — 12 p. [in Russian]