



О повышении тепловой эффективности ПСК* в системах теплоснабжения путём оптимизации их режимных параметров**

Рецензия эксперта на статью получена 15.09.2021 [The expert review of the article received on September 15, 2021].

* Плоских солнечных коллекторов.

Основным и самым дорогостоящим элементом системы солнечного теплоснабжения (ССТ) является солнечный коллектор (СК). Поэтому задача повышения его тепловой эффективности и оптимизации массогабаритных характеристик и параметров теплотехнического совершенства находится в постоянном поле зрения многих исследователей.

В 2020 году в мире общая площадь установленных СК в составе различных гелиоустановок составила 715 млн м² [1]. При этом с 2000 по 2020 годы общая площадь установленных СК в мире увеличилась в 7,6 раза [1], из которых более 71 % составляют трубчатые вакуумированные СК [1], в большинстве из которых используются двухслойные трубки китайского производства [2]. Остальные 29 % приходится на плоские солнечные коллекторы (ПСК), которые нашли широкое применение в европейских странах.

Следует заметить, что темпы применения СК в настоящее время уменьшаются, а производство СК в мире постоянно падает [2]. На европейском рынке СК также наблюдается застой: объем ввода кол-

лекторов в эксплуатацию сокращается на протяжении более десяти лет. Начиная с 2009 года, основной задачей европейской гелиотехнической науки стал поиск путей снижения стоимости плоских солнечных коллекторов и систем солнечного теплоснабжения в целом [2].

В течение последних 15 лет массогабаритные характеристики и параметры теплотехнического совершенства плоских СК практически не изменились. Они являются достаточно хорошо отработанными в мировой практике, и вышли на параметры близкие к своим предельным значениям [2]. Иначе говоря, существенного повышения эффективности использования солнечной тепловой энергии в ССТ за счёт совершенствования массогабаритных характеристик и теплотехнических параметров отдельных конструкций ПСК в обозримом будущем не приходится.

Поэтому представляется перспективным повышение эффективности использования существующих плоских солнечных коллекторов в системах теплоснабжения путём оптимизации их режимных параметров.

УДК 697.34:697.329. Научная специальность: 05.23.03.

К вопросу повышения тепловой эффективности плоских солнечных коллекторов в системах теплоснабжения путём оптимизации их режимных параметров

Ю. К. Рашидов, д.т.н., с.н.с., профессор, Ташкентский архитектурно-строительный институт (ТАСИ, г. Ташкент, Республика Узбекистан); М. М. Исmoilов, аспирант, Ферганский политехнический институт (ФерПИ, г. Фергана, Республика Узбекистан)

В статье рассматривается задача повышения тепловой эффективности плоских солнечных коллекторов в системах теплоснабжения путём оптимизации их режимных параметров в условиях, когда их массогабаритные характеристики и параметры теплотехнического совершенства уже достаточно хорошо отработаны в мировой практике, изучены и достигли величин, близких к предельным значениям. Показано, что повышение КПД плоских солнечных коллекторов в системах теплоснабжения может быть достигнуто двумя способами: 1) за счёт однократного нагрева воды в солнечных коллекторах при низких скоростях потока и высокой величине градиента температуры вдоль направления движения жидкости; 2) путём улучшения равномерности распределения потока теплоносителя через подъёмные трубы и уменьшения градиента температуры перпендикулярно направлению движения жидкости.

Ключевые слова: плоский солнечный коллектор, система солнечного теплоснабжения, тепловая эффективность, распределение температуры, расход теплоносителя, эксплуатационная готовность, кратности нагрева.

UDC 697.34:697.329. Scientific specialty number: 05.23.03.

To the question of improving thermal efficiency of flat solar collectors in heat supply systems by optimizing their mode parameters

Yu. K. Rashidov, Doctor of Technical Sciences, Senior Research Officer, Professor, Tashkent Architecture and Construction Institute (Tashkent city, The Republic of Uzbekistan); M. M. Ismoilov, magister, doctoral candidate, Fergana Polytechnic Institute (Fergana city, The Republic of Uzbekistan)

This article discusses the task of increasing the thermal efficiency of flat solar collectors in heat supply systems by optimizing their operating parameters under conditions when their weight and size characteristics and thermal engineering parameters are already well developed in world practice, studied and reached values close to the limit values. It is shown that an increase in the efficiency of flat solar collectors in heat supply systems can be achieved in two ways: 1) due to a single heating of water in solar collectors at low flow rates and a high temperature gradient along the direction of fluid movement; 2) by improving the uniformity of the distribution of the coolant flow through the lifting pipes and reducing the temperature gradient perpendicular to the direction of fluid movement.

Key words: flat solar collector, solar heat supply system, thermal efficiency, temperature distribution, coolant flow, availability, heating rate.

** Данная работа выполнена при поддержке Министерства по инновационным технологиям Республики Узбекистан в рамках фундаментального гранта ББ-М-ФЗ-003.

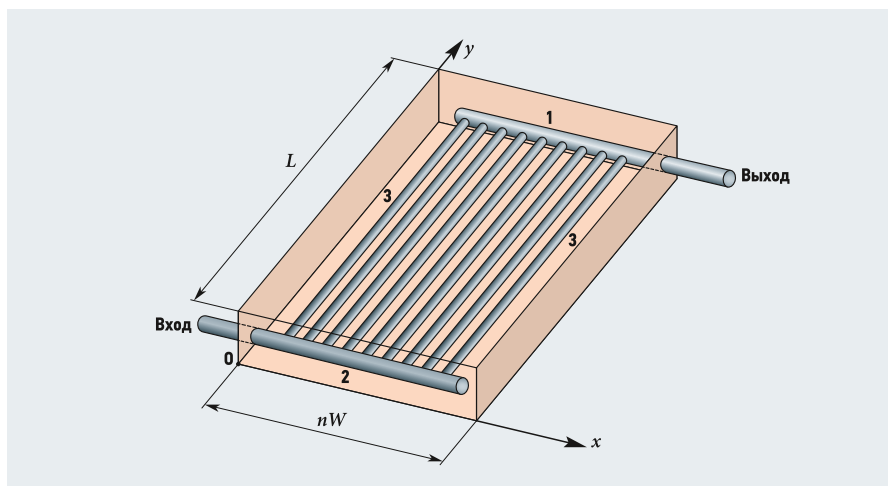


Рис. 1. Плоский солнечный коллектор вида «лист-труба» (1 — верхний гидравлический коллектор; 2 — нижний гидравлический коллектор; 3 — параллельные трубы в количестве n штук, расположенные на расстоянии W друг от друга)

В отличие от традиционных топливных и электрических генераторов теплоты [3], эффективность работы ПСК очень сильно зависит от средней температуры поглощающей теплообменной панели [4], которая обычно имеет конструкцию вида «лист-труба» (рис. 1).

Так, например, в первом приближении можно считать, что повышение рабочей температуры нагрева на каждый градус в плоском солнечном коллекторе приводит к снижению его КПД на 1–2% [4]. Поэтому один и тот же СК в одних и тех климатических условиях, при различных режимных параметрах эксплуатации в ССТ, может генерировать теплоту с различной тепловой эффективностью.

Определение средней температуры поглощающей теплообменной панели является довольно сложной задачей [4], поскольку для этого требуется детальное исследование распределения температуры в плоскости коллектора по осям

Ox и Oy (рис. 2а). Под действием тепла, сообщаемого жидкости, она нагревается и в ней возникает градиент температуры в направлении течения (по оси Oy). Поскольку на любом участке коллектора общий уровень температуры определяется уровнем местной температуры жидкости, пространственная картина температурного поля будет выглядеть подобно показанной на рис. 2б. Распределения температуры в направлении оси Ox при любом значении Oy и в направлении оси Oy при любом значении Ox представлены на рис. 2в и г.

Таким образом, для повышения эффективности плоских солнечных коллекторов в системах теплоснабжения путём оптимизации их режимных параметров необходимо проанализировать влияние данных параметров на распределение температуры панели в двух взаимно перпендикулярных направлениях: вдоль и поперёк направления течения жидкости.

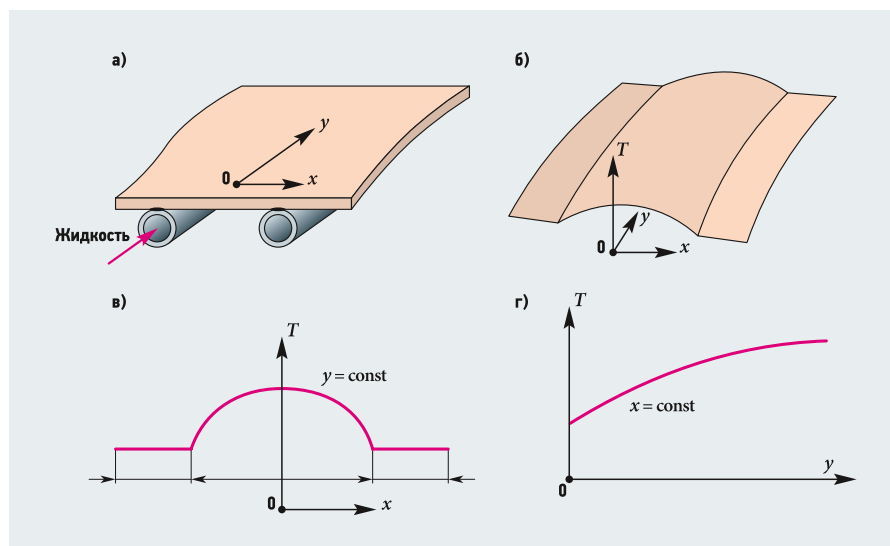


Рис. 2. Распределение температуры поглощающей теплообменной панели плоского солнечного коллектора вида «лист-труба» [4]

Целью исследования является выявление особенностей повышения эффективности плоских солнечных коллекторов в системах теплоснабжения путём оптимизации их режимных параметров, влияющих на величину средней температуры поглощающей теплообменной панели.

Рассмотрим и проанализируем режимные параметры, оказывающие влияние на величину средней температуры поглощающей теплообменной панели вдоль направления течения жидкости (по оси Oy) и на тепловую эффективность плоских солнечных коллекторов в системах теплоснабжения. Расход теплоносителя через солнечный коллектор является одним из основных режимных параметров, влияющих на его эффективность и эксплуатационную готовность системы солнечного горячего водоснабжения (СГВ).

Для повышения эффективности ПСК в системах теплоснабжения необходимо проанализировать влияние градиента температур в трубопроводах ПСК (пространственную картину температурного поля)

Известно, что до 1980 года в насосных системах СГВ расход теплоносителя выбирался на уровне $54 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ [4]. В последние годы стали применять установки с существенно меньшим удельным расходом, обеспечивающим лучшую температурную стратификацию воды в баке-аккумуляторе и высокую эксплуатационную готовность системы, которая уже через час-полтора позволяет подавать горячую воду потребителю с требуемой температурой. Например, в Швеции типичные удельные расходы составляют от $7,2$ до $21,6 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ [4].

Существенным преимуществом установок с малым удельным расходом, как отмечается в работе [5], является снижение мощности циркуляционного насоса и диаметров трубопроводов, что обуславливает и снижение капитальных и эксплуатационных затрат. При этом потенциальный выигрыш в доле покрытия солнечной энергии для солнечной установки с идеально стратифицированным баком и с малым удельным расходом воды через СК в диапазоне от $7,2$ до $25,2 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, по сравнению с полностью перемешанным баком и большим удельным расходом воды через солнечный коллектор порядка $36\text{--}72 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, может достигать $\frac{1}{3}$ [4]. Повышение доли покрытия нагрузки в такой установке возможно с $0,48$ до $0,66$.

Однако следует заметить, что на практике столь существенного выигрыша пока получить не удалось вследствие сложности реализации хорошей температурной стратификации в баке. Вместе с тем положительный эффект был подтверждён экспериментально, например, в работе [6].

Изменение удельного расхода теплоносителя через СК, работающий на бак-аккумулятор, сопряжено с факторами, оказывающими противоположное влияние на суточную эффективность работы систем СГВ. Если увеличение удельного расхода теплоносителя через СК и связанное с этим уменьшение температурного перепада на нём, с одной стороны, приводит к интенсификации отвода тепла от него, то с другой стороны это способствует постоянному росту в течение дня температуры воды, питающей СК. Это в дневном разрезе работы систем СГВ приводит к увеличению средней температуры СК.

Уменьшение же величины удельного расхода теплоносителя через СК и связанное с этим увеличение температурного перепада на нём, с одной стороны, приводит к уменьшению интенсивности отвода тепла от него, но с другой стороны — обеспечивает подпитку СК водой с постоянно низкой начальной температурой. Это в дневном разрезе работы систем СГВ обеспечивает постоянство средней температуры абсорбера СК.

Отсюда следует, что оценку эффективности работы систем СГВ с плоскими солнечными коллекторами следует выполнять по суточной их теплопроизводительности с учётом кратности нагрева теплоносителя в СК [7].

Рассмотрим и проанализируем режимные параметры, оказывающие влияние на величину средней температуры поглощающей теплообменной панели поперёк направления течения жидкости (по оси Ox) и на тепловую эффективность плоских солнечных коллекторов в системах теплоснабжения. В данном случае большое значение имеет равномерность распределения расхода жидкости по подъёмным трубам плоского солнечного коллектора [4]. При неравномерном распределении потока некоторые участки СК, содержащие подъёмные трубы с малым расходом, могут иметь температуру, намного превышающую температуру участков с более высоким расходом жидкости.

Аналитические и экспериментальные исследования данной проблемы выполнены в [8–10], в которых оценено влияние неравномерности распределения потока жидкости в системе СВК на выработку тепла при различных (малых, средних и больших) удельных расходах и схемах



соединения коллекторов между собой. В [8] приведён обзор некоторых исследований равномерности распределения расхода в СК, там же представлен аналитический метод расчёта распределения расхода и его экспериментальная верификация.

В [9] приведены результаты аналитических и экспериментальных исследований влияния неравномерности распределения потока жидкости по подъёмным трубам лучепоглощающей теплообменной панели СК листотрубного типа на выработку тепла. Опыты проводились в натурных условиях на одной из секций солнечной установки, предназначенной для горячего водоснабжения гостиницы и состоящей из десяти параллельных ветвей с четырьмя последовательно соединёнными СК в каждой ветви.

Изменение удельного расхода теплоносителя через СК, работающий на бак-аккумулятор, сопряжено с факторами, оказывающими противоположное влияние на суточную эффективность работы систем СГВ

Диапазон изменения удельных расходов жидкости через СК, как при диагональной схеме расположений подводящего и отводящего патрубков (Z-схема), так и при расположении этих патрубков с одной стороны секции (П-схема), составлял $g = 5\text{--}30 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$. В экспериментах измерялась температура воды на выходе из каждой ветви секции СК, которая являлась мерой того, насколько эффективно от СК отводится энергия.

Отличия в температурах между ветвями секции солнечного коллектора является также мерой недостатка равномерности распределения расхода, поскольку на входе в каждую ветвь подавалась однородная водопроводная вода с одинаковой

температурой, которая также замерялась.

Для Z-схемы при малых [$g = 5,15 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$] и средних [$10,6 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$], а для П-схемы только при малых [$4,96 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$] удельных расходах наблюдалось практически равномерное распределение потока по отдельным ветвям секции СВК, о чём можно судить по незначительным отличиям температуры ($\pm 2\text{--}3^\circ\text{C}$) на выходе из параллельных ветвей.

Для Z-схемы при больших [$g = 29,4 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$], а для П-схемы при средних [$20 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$] и больших [$30,4 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$] удельных расходах наблюдалась ощутимая неравномерность распределения потока через крайние 9 и 8 ветви секции СК, в которых отличия температуры составляют уже до $\pm 4\text{--}5^\circ\text{C}$ от среднего значения, а по сравнению с самой крайней ветвью 10 отличаются на $8\text{--}10^\circ\text{C}$.

В [10] приведены результаты измерения температур при малых, средних и больших удельных расходах для батареи из 12-ти СК, соединённых между собой параллельно. Согласно экспериментальным данным, разности температур между центральной частью и крайними участками батареи при больших расходах достигают 22°C , а с уменьшением удельных расходов через СК, аналогично опытным данным [5], эти разности температур уменьшаются. Тем не менее, это различие весьма существенное и поэтому оказывает сильное влияние на общую тепловую эффективность батареи СК. Поэтому на основании результатов исследований в [10] рекомендуют применять в конструкциях гидравлические каналы достаточно большого диаметра с тем, чтобы падения давления в основном имело место в подъёмных трубах. В батареях СК с принудительной циркуляцией, при числе подъёмных труб более 24-х, рекомендуется вместо параллельного соединения применять последовательно-параллельное или параллельно-последовательное соединение.

При конструировании и проектировании отдельных коллекторов и батареи СК с заданной неравномерностью распределения потока необходимо знать количественную взаимосвязь между вышеперечисленными конструктивными параметрами, которая приведена нами в работе [11]. Метод гидравлического расчёта теплообменной панели водонагревательного СК листотрубного типа с заданной неравномерностью распределения потока жидкости в условиях принудительной циркуляции приведён нами в [12].

Выводы

Повышения тепловой эффективности плоских солнечных коллекторов в системах теплоснабжения, в условиях, когда их массогабаритные характеристики и параметры тепло-технического совершенства уже достаточно хорошо отработаны, изучены и достигли величин, близких к предельным значениям, можно достигнуть путём оптимизации режимных параметров ПСК двумя способами:

- за счёт однократного нагрева воды в солнечных коллекторах с малым её удельным расходом в диапазоне от 7,2 до 25,2 кг/(м²·с), соответствующим низким скоростям потока и высокой величине градиента температуры вдоль направления движения жидкости в СК, которая обеспечивает общее повышение доли покрытия тепловой нагрузки потребителя с 0,48 до 0,66 благодаря высокой температурной стратификации воды в аккумуляторном баке;
- путём улучшения равномерности распределения потока теплоносителя через подъёмные трубы и уменьшения градиента температуры перпендикулярно направлению движения жидкости в среднем от 4 до 5 °С и соответствующем повышении КПД СК на такую же величину. ●

1. Weiss W., Spörk-Dür M. Solar heat worldwide. Global market development and trends in 2020. Detailed market figures 2019. 2021 edition. AEE INTEC; IEA SHC Programme; Austrian MTIT. Steinhuber Infodesign. Graz, Austria. 2021. 86 p.
2. Фрид С.Е., Лисицкая Н.В. Современные солнечные коллекторы: типичные параметры и тенденции их изменения // Гелиотехника, 2018. №2. С. 27–37.
3. Рашидов Ю.К. Системы солнечного теплоснабжения: мировой опыт и перспективы развития в условиях Узбекистана / Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность — 2019 (ЭПЭБ-2019): Мат. Межд. науч.-практ. конф. (Севастополь, 23–26.09. 2019). — Севастополь: Минобрнауки России; ИЯЭП СевГУ, 2019. С. 1361–1365.
4. Даффи Дж., Бекман У. Основы солнечной теплоэнергетики: учебно-справочное руководство / Пер. с англ. — Долгопр.: ИД «Интеллект», 2013. 888 с.
5. Hollands K.G.T., Lightstone M.F. A review of low-flow. Stratified-tank solar water heating systems. Solar Energy. 1989. Vol. 43. Issue 2. Pp. 97–105.
6. Carvalho M.J., Collares-Pereira M., Cunha F.M., Vitorino C. An experimental comparison of operating strategies for solar water systems. Solar Energy. 1988. Vol. 41. Issue 1. Pp. 33–39.
7. Рашидов Ю.К. Оценка эффективности систем солнечного горячего водоснабжения с однократным нагревом воды в плоских солнечных коллекторах / Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность — 2018 (ЭПЭБ-2018): Мат. Межд. науч.-практ. конф. (Севастополь, 24–27.09.2018). — Севастополь: Минобрнауки России; ИЯЭП СевГУ, 2018. С. 993–997.
8. Weitbrecht V., Lehmann D., Richter A. Flow distribution in solar collectors with laminar flow conditions. Solar Energy. Vol. 73. Issue 6. 2002. Pp. 433–441.
9. Смирнов С.И., Константиновский Ю.А., Торшин А.С. Влияние неравномерности распределения потока жидкости в системах солнечных коллекторов на выработку тепла // Гелиотехника, 1981. №1. С. 24–28.
10. Dunkle R.V., Davey E.T. Flow distribution in absorber banks. Proc. of the International Solar Energy Society Conference. Melbourne, Australia. 1970.
11. Рашидов Ю.К., Вохидов А.У. Повышение равномерности распределения потока жидкости по подъёмным трубам лучепоглощающей теплообменной панели солнечного водонагревательного коллектора листотрубного типа в условиях принудительной циркуляции // Гелиотехника, 2016. №4. С. 8–14.
12. Рашидов Ю.К., Орзиматов Ж.Т., Рашидов К.Ю., Файзиев З.Ф. Метод гидравлического расчёта теплообменной панели солнечного водонагревательного коллектора листотрубного типа с заданной неравномерностью распределения потока жидкости в условиях принудительной циркуляции / Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность — 2019 (ЭПЭБ-2019): Мат. Межд. науч.-практ. конф. (Севастополь, 23–26.09.2019). — Севастополь: Минобр-науки России; ИЯЭП СевГУ, 2019. С. 1391–1395.

[References — see page 78.](#)

To the question of improving thermal efficiency of flat solar collectors in heat supply systems by optimizing their mode parameters. Pp. 52–55.

Yusuf K. Rashidov, Tashkent Architecture and Construction Institute (Tashkent city, The Republic of Uzbekistan); **Ma'murjon M. Ismoilov**, magister, doctoral candidate, Fergana Polytechnic Institute (Fergana city, The Republic of Uzbekistan)

1. W. Weiss, M. Spörk-Dür. Solar heat worldwide. Global market development and trends in 2018. Detailed market figures 2017. 2019 edition. AEE INTEC; IEA SHC Programme; Austrian MTIT. Steinhuber Infodesign. Graz, Austria. 2019. 86 p.
2. S.E. Frid, N.V. Lisickaja. *Sovremennye solnechnye kollektory: tipichnye parametry i tendencii ih izmenenija* [Modern solar collectors: typical parameters and their trends]. *Geliotekhnika* ["Solar technology" Magazine]. 2018. No. 2. Pp. 27–37. [In Russian]
3. Ju.K. Rashidov. *Sistemy solnechnogo teplosnabzhenija: mirovoj opyt i perspektivy razvitiya v usloviyah Uzbekistana* [Solar heat supply systems: world experience and development prospects in Uzbekistan]. *Jekologicheskaja, promyshlennaja i jenergeticheskaja bezopasnost' — 2019 (JePeB-2019): Mat. Mezhd. nauch.-prakt. konf.* [Environmental, Industrial and Energy Safety 2019 (EIES-2019). Proc. of the International Scientific and Practical Conference]. Sevastopol, September 23–26, 2019. *Minobrnauki Rossii* [Ministry of Education and Science of the Russian Federation]. *IJaJeP SevGU* [Institute of Nuclear Energy and Industry of the Sevastopol State University]. 2019. Pp. 1361–1365. [In Russian]
4. Dzh. Daffi, U. Bekman. *Osnovy solnechnoj teplojenergetiki: uchebno-spravochnoe rukovodstvo* [Fundamentals of solar thermal power engineering: training and reference guide]. Transl. from English. Dolgoprudny. ID "Intellekt" ["An intelligence" PH]. 2013. 888 p. [In Russian]
5. K.G.T. Hollands, M.F. Lightstone. A review of low-flow, Stratified-tank solar water heating systems. *Solar Energy*. 1989. Vol. 43. Issue 2. Pp. 97–105.
6. M.J. Carvalho, M. Collares-Pereira, F.M. Cunha, C. Vitorino. An experimental comparison of operating strategies for solar water systems. *Solar Energy*. 1988. Vol. 41. Issue 1. Pp. 33–39.
7. Ju.K. Rashidov. *Ocenka jeffektivnosti sistem solnechnogo gorjachego vodosnabzhenija s odnokratnym nagrevom vody v ploskih solnechnyh kollektorah* [Evaluation of the efficiency of solar hot water supply systems with a single heating of water in flat solar collectors]. *Jekologicheskaja, promyshlennaja i jenergeticheskaja bezopasnost' — 2018 (JePeB-2018): Mat. Mezhd. nauch.-prakt. konf. (Sevastopol', 24–27.09.2018)* [Environmental, Industrial and Energy Safety 2018 (EIES-2018). Proc. of the International Scientific and Practical Conference (Sevastopol, September 24–27, 2018)]. Sevastopol. *Minobrnauki Rossii* [Ministry of Education and Science of the Russian Federation]. *IJaJeP SevGU* [Institute of Nuclear Energy and Industry of the Sevastopol State University]. 2018. Pp. 993–997. [In Russian]
8. V. Weibrecht, D. Lehmann, A. Richter. Flow distribution in solar collectors with laminar flow conditions. *Solar Energy*. Vol. 73. Issue 6. 2002. Pp. 433–441.
9. S.I. Smirnov, Ju.A. Konstantinovskij, A.S. Torshin. *Vlijanie neravnomernosti raspredelenija potoka zhidkosti v sistemah solnechnyh kollektorov na vyrabotku tepla* [Influence of uneven distribution of fluid flow in solar collector systems on heat generation]. *Geliotekhnika* ["Solar technology" Magazine]. 1981. No. 1. Pp. 24–28. [In Russian]
10. R.V. Dunkle, E.T. Davey. Flow distribution in absorber banks. Proc. of the International Solar Energy Society Conference. Melbourne, Australia. 1970.
11. Ju.K. Rashidov, A.U. Vohidov. *Povyshenie ravnomernosti raspredelenija potoka zhidkosti po pod#jomnym trubam luchepogloshhajushhej teploobmennoj paneli solnechnogo vodonagrevatel'nogo kolektora listotrubnogo tipa v usloviyah prinuditel'noj cirkuljacii* [Increasing the uniformity of the distribution of the liquid flow through the riser tubes of the radiant heat exchange panel of the solar water-heating collector of the sheet-tube type under conditions of forced circulation]. *Geliotekhnika* ["Solar technology"]. 2016. No. 4. Pp. 8–14. [In Russian]
12. Ju.K. Rashidov, Zh.T. Orzimatov, K.Ju. Rashidov, Z.F. Fajziev. *Metod gidravlicheskogo raschjota teploobmennoj paneli solnechnogo vodonagrevatel'nogo kolektora listotrubnogo tipa s zadannoju neravnomernost'ju raspredelenija potoka zhidkosti v usloviyah prinuditel'noj cirkuljacii* [Method of hydraulic calculation of the heat exchange panel of a solar water-heating collector of sheet-tube type with a given uneven distribution of the liquid flow under conditions of forced circulation]. *Jekologicheskaja, promyshlennaja i jenergeticheskaja bezopasnost' — 2019 (JePeB-2019): Mat. Mezhd. nauch.-prakt. konf.* [Environmental, Industrial and Energy Safety 2019 (EIES-2019). Proc. of the International Scientific and Practical Conference]. Sevastopol, September 23–26, 2019. *Minobrnauki Rossii* [Ministry of Education and Science of the Russian Federation]. *IJaJeP SevGU* [Institute of Nuclear Energy and Industry of the Sevastopol State University]. 2019. Pp. 1391–1395. [In Russian]