

УДК 338.28: 697.329

ИССЛЕДОВАНИЕ И ИСПЫТАНИЯ ВАКУУМНЫХ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Слесаренко И.В.

*ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет»,
Владивосток, e-mail: ivslesarenko@rambler.ru*

Приведены результаты испытаний типовых солнечных коллекторов на специализированном стенде в различные периоды года с учетом климатических условий Дальневосточного региона. В работе рассмотрены особенности эксплуатации солнечных водонагревательных установок, оснащенных вакуумными трубчатыми коллекторами. В работе представлены результаты анализа энергетических показателей солнечных коллекторов. Определены условия, обеспечивающие повышение КПД основных узлов солнечных водонагревательных установок в системах теплоснабжения. Исследования рабочих процессов в солнечных коллекторах плоского типа и с вакуумными трубками были проведены в натурных условиях г. Владивостока на специализированном стенде. В результате исследований установлено, что вакуумный коллектор начинает генерацию теплоты раньше и заканчивает позже по сравнению с плоским коллектором за счет использования рассеянного излучения. Подтверждено также, что коллектор этого типа обладает лучшей тепловой изоляцией. В результате исследований установлено, что вакуумный коллектор начинает генерацию теплоты раньше и заканчивает позже по сравнению с плоским коллектором, за счет использования рассеянного излучения. Подтверждено также, что коллектор этого типа обладает лучшей тепловой изоляцией.

Ключевые слова: испытания коллекторов, солнечный коллектор, теплоснабжение, эффективность солнечных установок

RESEARCH AND TESTING OF VACUUM SOLAR COLLECTORS IN THE HEATING SYSTEM

Slesarenko I.V.

Far Eastern Federal University, Vladivostok, e-mail: ivslesarenko@rambler.ru

The paper presents the experimental solar water heating system with vacuum tube collectors observed and analyzed during operation. Operational cycles proceeded at different times of the year. The analysis takes into account the climatic conditions of the Far Eastern region of Russia. Obtained results clearly describe the energy performance of solar collectors and provide the key factors for the improvement of the efficiency of solar water heating systems implemented in original heating systems. The conditions to ensure the improvement of the efficiency of the basic units of solar water heating systems in heating systems. Research work processes in the solar collectors and flat type with vacuum tubes were carried out in natural conditions in Vladivostok on a special stand. The studies found that the vacuum collector heat generation starts earlier and ends later than a flat collector, through the use of the scattered radiation. Reaffirming also that the collector of this type has a better thermal insulation. The studies found that the vacuum collector heat generation starts earlier and ends later than a flat collector, through the use of the scattered radiation. Reaffirming also that the collector of this type has a better thermal insulation.

Keywords: collectors research, solar collector, solar heating, efficiency of solar systems

При конструировании систем теплоснабжения, оснащенных солнечными водонагревательными установками (СВНУ), важной задачей является оценка эффективности работы солнечных коллекторов различного типа в климатических условиях Дальневосточного региона. В России имеются обширные результаты исследований, связанных с испытаниями коллекторов плоского типа [1, 4, 9, 10, 11]. В то же время количество данных по испытаниям вакуумных коллекторов и экспериментальной оценке рабочих процессов в опытно-промышленных СВНУ с вакуумными коллекторами в отечественной практике ограничено [2, 8].

Цель исследования состоит в экспериментальной проверке показателей эффективности солнечных коллекторов с ваку-

умными трубками, в сравнении с другими типами солнечных коллекторов в условиях Дальнего Востока России, а также в сравнении теоретических (расчетных) и практических показателей солнечной установки, включающей в схему не только систему солнечных коллекторов со всеми сопутствующими элементами (теплообменники, тепловой аккумулятор и т.д.), но также тепловой насос для отбора части тепловой энергии от бака-аккумулятора и снижения средней температуры теплоносителя в первом контуре.

Эффективность солнечных коллекторов зависит от мощности падающего в плоскость коллектора солнечного излучения, температуры окружающего атмосферного воздуха и температуры теплоносителя, протекающего через коллектор.

В экспериментах эффективность солнечного коллектора обычно определяется как отношение полезной энергии, генерируемой коллектором, к мощности солнечного излучения:

$$\eta_{\text{ск}} = Q_{\text{ск}} / (J F_{\text{к}}). \quad (1)$$

Полезная энергия, полученная от солнечного коллектора, находится с учетом влияния оптического КПД и тепловых потерь:

$$Q_{\text{ск}} = J(\tau\alpha) \cdot F_{\text{к}} - U_{\text{к}} F_{\text{к}} (T_{\text{т}} - T_{\text{в}}). \quad (2)$$

Исходя из зависимостей (1), (2) выражение для расчета эффективного КПД солнечного коллектора можно представить в виде

$$\eta_{\text{ск}} = (\tau\alpha) - U_{\text{к}} \cdot (T_{\text{к}} - T_{\text{в}}) / J, \quad (3)$$

где J – интегральная плотность солнечной энергии, падающая на м^2 абсорбера коллектора; τ – коэффициент пропускания стекла; α – поглощательная способность абсорбера; $F_{\text{к}}$ – площадь коллектора; $U_{\text{к}}$ – коэффициент тепловых потерь коллектора; $T_{\text{т}}$ – температура теплоносителя; $T_{\text{в}}$ – температура окружающего воздуха.

Из всей поступающей на солнечный коллектор солнечной энергии полезно используется только часть этой энергии, а тепловые потери возвращаются в окружающую среду. В ряде случаев эффективность работы солнечных коллекторов различных типов оценивается суммарным коэффициентом тепловых потерь $U_{\text{к}}$. Для неостекленных солнечных коллекторов $U_{\text{к}} \approx 21 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, для остекленных плоских коллекторов $U_{\text{к}} \approx 4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и для вакуумных трубчатых коллекторов $U_{\text{к}} \approx 1,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ [2, 5, 12].

Исследования рабочих процессов в солнечных коллекторах плоского типа и с вакуумными трубками были проведены в натурных условиях г. Владивостока на специализированном стенде Лаборатории нетрадиционной энергетики ДВО РАН. Экспериментальный стенд позволяет производить мониторинг рабочих параметров коллекторов в течение длительного времени [2, 3]. Измерение расхода теплоносителя одновременно в нескольких солнечных коллекторах дает возможность эквивалентно регулировать расход теплоносителя, что важно при сравнении эффективности работы солнечных коллекторов разных типов.

В результате исследований установлено, что вакуумный коллектор начинает генерацию теплоты раньше и заканчивает позже по сравнению с плоским коллектором, за счет использования рассеянного излучения. Подтверждено также, что коллектор этого типа обладает лучшей тепловой изоляцией. Однако производительность вакуумного коллектора могут уменьшать осадки в виде снега (рис. 1). Для оценки применения коллекторов в зимних условиях были выполнены специальные исследования. Как плоские, так и трубчатые вакуумные коллекторы достаточно быстро освобождаются от наносов снега за счет его естественного таяния. Несмотря на небольшую задержку в процессе самоочищения от снежного покрытия вакуумные коллекторы имеют более высокие среднемесячные показатели по выработке теплоты (рис. 2).



Рис. 1. Испытание разных типов коллекторов (плоского и вакуумных трубчатых) на стенде Лаборатории нетрадиционной энергетики ДВО РАН. Самоочищение от снега

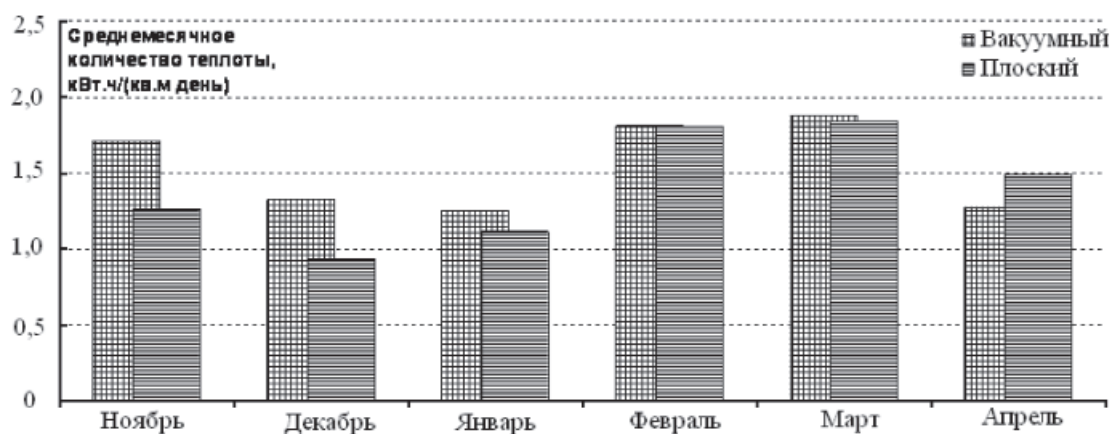


Рис. 2. Удельная среднемесячная выработка тепловой энергии коллекторами на опытном стенде в период с ноября 2012 по апрель 2013 гг.

С учетом проведенных предварительных стендовых испытаний основные исследования по определению характеристик солнечных коллекторов были направлены на изучение параметров коллекторов вакуумного типа как наиболее эффективных для климатических условий Дальневосточного региона. Технические характеристики широко применяемого при конструировании СВНУ вакуумного коллектора (производства КНР) типа ES58-1800-15R представлены в табл. 1.

При испытаниях солнечных коллекторов использовался незамерзающий теплоноситель – 40% водный раствор 1,2-пропиленгликоля. В качестве контрольного показателя выбрана комплексная энергетическая характеристика коллектора $\Xi = f(\Delta T/QC)$, показывающая, какое количество тепловой энергии выработано коллектором за день при известном рабочем перепаде температур $\Delta T = (T_T - T_B)$ и опре-

деленной интенсивности солнечной радиации $QC = J(\tau\alpha)F_k$.

Таблица 1

Техническая характеристика коллектора

Количество труб	30 труб
Общая ширина (включая вх./вых. патрубки)	2575 мм
Общая длина	1950 мм
Общая глубина	155 мм
Общая площадь поверхности	5,02 м²
Площадь апертуры (по стеклу)	4,09 м²
Площадь абсорбера	2,44 м²
Диаметр вх./вых. патрубков	22×1

Энергетическая характеристика, полученная в результате испытаний и мониторинга показателей работы вакуумного солнечного коллектора, представлена на рис. 3.

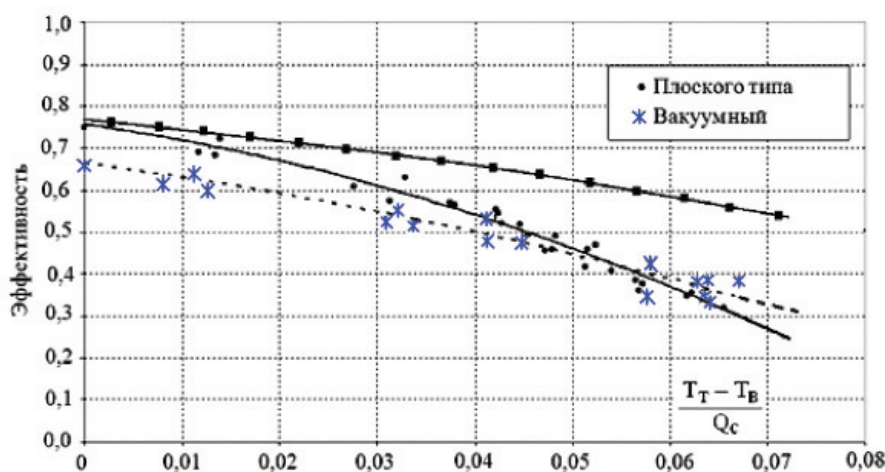


Рис. 3. Результаты эксперимента по определению энергетической характеристики солнечных коллекторов; --■--■-- теоретический расчет (без учета влияния оптического КПД)

Таблица 2

Показатели эффективности
вакуумного коллектора

Оптический КПД	Коэффициент потерь		
$\eta_{\text{опт}}$	U_k , Вт/°C/м ²	k_1 , Вт/°C/м ²	k_2 , (Вт/°C/м ²) ²
0,875	2,767	1,838	0,929

Примечания: * k_1 – коэффициент потерь в окружающую среду за счет конвективного теплообмена с поверхности коллектора; k_2 – коэффициент потерь за счет отраженного радиационного излучения, $U_k = k_1 + k_2$.



Рис. 4. Диаграмма поступления солнечной радиации и удельной выработки тепловой энергии вакуумным солнечным коллектором

Замеры параметров солнечного коллектора на стенде и дальнейшая аппроксимация представленной энергетической характеристики $\dot{Q} = f(\Delta T/QC)$ позволили определить значения оптического КПД и коэффициентов потерь для вакуумного коллектора (табл. 2).

На рис. 4 представлена диаграмма дневного поступления солнечной радиации и удельной выработки тепловой энергии солнечным коллектором в процессе испытаний на стенде за осенне-зимний период (с 23.09.2013 по 05.12.2013).

Критериями ориентации коллекторов являются угол наклона и азимут. Наибольшее количество энергии воспринимается поглотителем коллектора при расположении плоскости коллектора под прямым углом

к направлению инсоляции. Поскольку угол инсоляции зависит от времени суток и года, ориентацию плоскости коллектора следует выполнять в соответствии с высотой Солнца в период поступления наибольшего количества солнечной энергии. На практике рекомендуемый угол наклона в зависимости от сезона эксплуатации солнечной установки может составлять от 25 до 70°. Поскольку наиболее интенсивная инсоляция наблюдается в середине дня, плоскость коллектора должна быть ориентирована юг. Допустимы отклонения от направления на юг до 45°. Поэтому при проведении исследований уточнялись значения оптимального угла наклона солнечных коллекторов при их различном расположении на крыше здания (табл. 3).

Таблица 3

Поступление солнечной энергии на поверхность, расположенную под различными углами к горизонту (г. Владивосток)

Период	Суммарная энергия солнечного излучения, кВт·ч/(м ²)		
Угол наклона коллекторов	0°	45°	90°
За год	1240	1552	1255
С мая по октябрь (включительно)	713	717	468
С ноября по май	527	835	787

В результате испытаний определено, что для условий Приморского края оптимальный угол наклона коллекторов составляет $42...47^\circ$ и в связи с утренними туманами наиболее рациональный азимут равен 15° к западу от южного направления.

Контроль параметров рабочих процессов в солнечных коллекторах на опытном стенде включал измерения следующих величин: температура входа теплоносителя в коллектор и выхода из него, температура окружающей среды, интенсивность солнечной радиации, расход теплоносителя через коллектор. Вся информация записывалась на компьютер для последующего анализа и обработки. Опытные данные по изменению параметров солнечного коллектора в зимний период приведены на рис. 5.

и эксплуатации солнечных вакуумных коллекторов при внедрении опытно-промышленных СВНУ на социальных и промышленных объектах в Дальневосточном регионе.

Имеющиеся данные подтверждают, что наиболее эффективными для получения повышенных температур теплоносителя в СВНУ являются вакуумные трубчатые коллекторы, средних температур – плоские остекленные коллекторы и низких (немного превышающих температуру окружающей среды) – неостекленные плоские коллекторы [6].

На основе наработанного опыта эксплуатации вакуумных коллекторов были спроектированы и построены несколько систем теплоснабжения с СВНУ и тепловыми насосами для промышленных, социальных

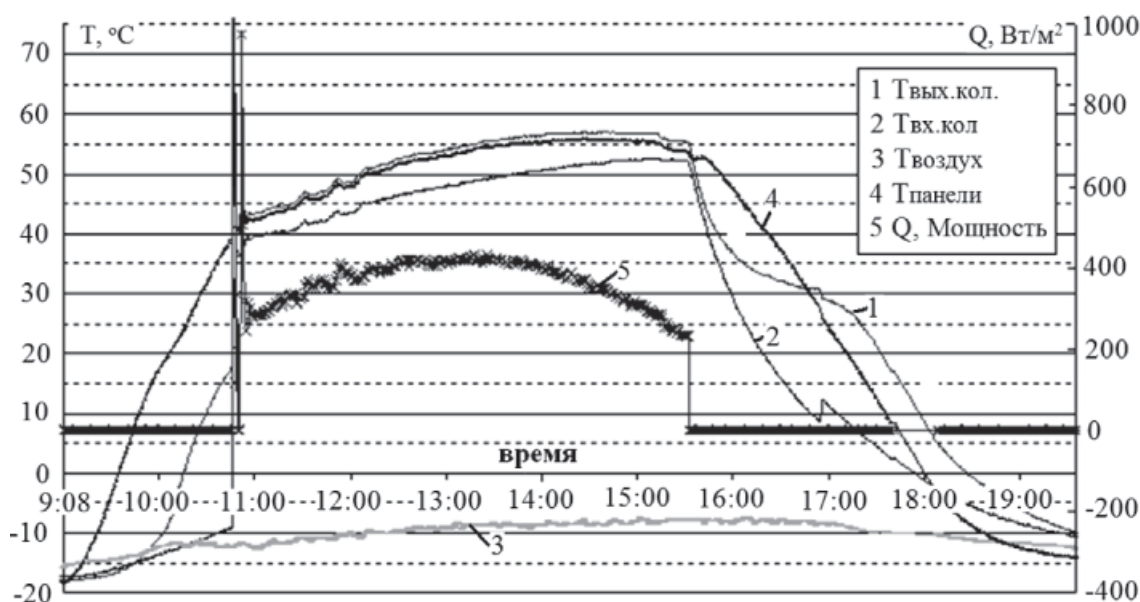


Рис. 5. Характерный режим работы коллектора (зимний период)

На рис. 5 приведены результаты испытаний коллекторов плоского типа и с вакуумными трубками и сравнение полученных данных с теоретическими расчетами. Максимальная эффективность исследованных солнечных коллекторов при интенсивности солнечной радиации в 1000 Вт/м^2 составила $65\text{--}75\%$, что эквивалентно удельной тепловой мощности $650\text{--}750 \text{ Вт/м}^2$. Анализ кривых показывает, что исследованный плоский коллектор обладает более высокими характеристиками при средних температурах нагрева рабочих сред и несколько худшими – при повышенных температурах по сравнению с типовым вакуумным трубчатый солнечным коллектором.

В результате испытаний были подготовлены рекомендации по установке, монтажу

объектов и индивидуальных потребителей в Дальневосточном регионе.

Выводы

1. Экспериментами подтверждено, что солнечные коллекторы с вакуумными трубками являются наиболее эффективными и надежными среди других типов солнечных коллекторов. Эти коллекторы лучше всего удовлетворяют умеренным температурным требованиям к теплоносителю ($50\text{--}95^\circ\text{C}$). Солнечные коллекторы с вакуумными трубками имеют внутренний медный стержень, который находится в запечатанной вакуумной трубке – «термосе», в результате тепловые потери относительно низки даже в холодных климатических условиях Дальнего Востока России.

2. Срок службы вакуумного коллектора составляет 20–25 лет. В течение солнечного дня в среднем по году вакуумный коллектор ES 58/1800-30 R1 генерирует до 10 кВт·ч теплоты. В среднем один солнечный вакуумный коллектор производит около 3 500 кВт·ч тепловой энергии в год.

3. Опыт эксплуатации солнечных коллекторов показывает, что чем ниже температура теплоносителя в коллекторе и меньше разность температур между теплоносителем и окружающей средой, тем выше эффективность коллектора. Поэтому предложено повысить эффективность работы вакуумных коллекторов путем включения в схему СВНУ теплового насоса для отбора части тепловой энергии от бака-аккумулятора и снижения средней температуры теплоносителя в первом контуре внедряемых солнечных водонагревательных установок. Такое решение позволило разработать эффективную конструкцию комбинированной солнечно-теплонасосной установки для теплоснабжения промышленных и социальных объектов Приморского края [7].

Список литературы

1. Бутузov В.А. Анализ опыта разработки и эксплуатации гелиоустановок в Краснодарском крае // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2002. – № 7. – С. 53–56.
2. Волков А.В., Ковалев О.П. Сравнение характеристик солнечных коллекторов различных типов // Приморские зори-2005: материалы Межд. научных чтений. – Вып. 2. – Владивосток: Изд-во ТАНЭБ, 2005. – С. 29–32.
3. Ковалев О.П., Волков А.В., Лощенков В.В. Стенд для исследования солнечных коллекторов // Труды ДВГТУ. – Вып. 136. – Владивосток, 2004. – С. 230–234.
4. Попель О.С. Сравнительный анализ показателей конструкций солнечных коллекторов зарубежного и отечественного производства. Новые технические решения // Теплоэнергетика. – 2006. – № 3. – С. 23–29.
5. Слесаренко В.В., Копылов В.В., Княжев В.В. Оценка эффективности установок солнечной энергетики в системах теплоснабжения // Вестник ДВО РАН. – 2010. – № 3. – С. 119–124.
6. Слесаренко И.В., Слесаренко И.Б. Исследование процессов генерации теплоты в схеме солнечно-теплонасосной установки // Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск № 4. Нефть и газ. – 2014. – С. 234–241. ISBN: 0236-1493.
7. Слесаренко В.В., Богданович Г.А., Жуков В.А., Слесаренко И.Б. Особенности применения гелиоустановок с тепловыми насосами // Энергосбережение и водоподготовка. – 2011. – № 5. – С. 24–28.
8. Судаев Е.М., Бастрон А.В. Исследование и производственные испытания в условиях Красноярского солнечных водонагревательных установок с вакуумированными коллекторами // Ползуновский Вестник. – 2011. – № 2/2. – С. 221–225.
9. Тарнижевский, Б.В. Состояние и перспективы использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии в России // Промышленная энергетика. – 2002. – № 1. – С. 52–56.
10. Фрид С.Е. Исследование эффективности солнечных коллекторов и водонагревательных установок и разработка методических основ их тепловых испытаний: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.01. – М.: Изд-во ОИВТ РАН, 2002. – 23 с.
11. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 208 с.
12. Souproun A.V. Dynamic method of solar collector testing // Solar Energy Eng. – 1992. – № 2. – P. 1149–1154.
1. Butuzov V.A. Analiz opyta razrabotki i ekspluatatsii gelioustanovok v Krasnodrskom krae // Satehnika, otoplenie, konditsionirovanie. 2002. no. 7. pp. 53–56.
2. Volkov AV., Kovalev O.P. Sravnenie harakteristik solnechnykh kollektorov razliynykh topov // Materialy mezhdunar. nauchnykh chteniy «Primorskie zori-2005». Vyp. 2. Vladivostok: Izdat. TANEB. 2005. pp. 29–32.
3. Kovulev O.P., Volkov A.V., Loshenkov V.V. Stend dlya issledovaniya solnechnykh kollektorov // Trudy DVG TU. Vyp. 136. Vladivostok. 2004. pp. 230–234.
4. Popel O.S. Sravnitelnyi analiz pokazatelei konstrukt-siy solnechnykh kollektorov zarubezhnogo i otechestvennogo proizvodstva. Novye tehicheskie resheniya. // Teploenergetika. 2006. no. 3. pp. 23–29.
5. Slesarenko V.V., Kopulov V.V., Knyazhev V.V. Otsenka effektivnosti ustanovok solnechnoi energetiki // Vestnik DVO RAN. 2010. no. 3. pp. 119–124.
6. Slesarenko I.V., Slesarenko I.B., Issledovanie protsessov generatsii teploty v sheme solnechno-teplonesosnoy ustanovki // Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten. Otdelnyi vypusk no. 4. Neft i gaz. 2014. pp. 234–241. ISBN: 0236–1493.
7. Slesarenko V.V., Bogdanovich G.A., Zhukov V.A., Slesarenko I.B. Osobennosti primeneniya gelioustanovok s teplovymi nasosami // Energoberezhenie i vodopodgotovka. 2011. no. 5. pp. 24–28.
8. Sudaev E.M., Bastron A.V. Issledovannie i proizvodstvennye ispytaniya v usloviyah Krasnoyarska solnechnykh vodonagrevatelnykh ustanovok s vakuumirovannymi kollektoremi // Polzunovskiy Vestnik. 2011, no. 2/2. pp. 221–225.
9. Tarnizhevskiy B.V. Sostoyanie i perspektivy ispol-zovaniya netraditsionnykh vozobnovlyaemykh istochnikov energii v Rossii // Promyshlennaya energetika. 2002. no. 1. pp. 52–56.
10. Frid S.E. Issledovanie effektivnosti solnechnykh kollektorov i vodonagrevatelnykh ustanovok i razrabotka metodicheskikh osnov ih teplovykh ispytaniy // Avtoreferat dis. kand.tehn. nauk: 05.14.01. M.: Izdat-vo OIIVT RAN. 2002. pp. 23.
11. Harchenko N.V. Individualnye solnechnye ustanovki. M.: Energoatomizdat. 1991. pp. 208.
12. Souproun A.V. Dynamic method of solar collector testing // Solar Energy Eng. 1992. no. 2. pp. 1149–1154.

References