

Ю. А. СЕЛИХОВ, В. О. КОЦАРЕНКО, І. Б. РЯБОВА, О. О. ГАПОНОВА

ИНТЕГРАЦИЯ ТЕПЛООБМІНУ СВІТЛОПРОЗОРИХ ПОКРИТТІВ В СОНЯЧНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ

Використання сонячної енергії – екологічно чистий, енергозберігаючий процес. Введення в експлуатацію сонячних установок покращує екологічну ситуацію району за рахунок зниження об'ємів викидів забруднюючих речовин, до яких відносяться продукти згорання традиційних видів енергії, - органічного палива. Про енергетичну ефективність застосування деяких матеріалів як світлопрозорого покриття, що накриває теплоізолюваний корпус, в якому розташований сонячний колектор, в технічній літературі існують розрізнені відомості. Застосування інших матеріалів і отримання узагальнених залежностей щільності теплового потоку і коефіцієнта корисної дії (ККД) від температури при зміні витрати теплоносія в сонячному колекторі залежно від пропускної спроможності одно- або багат шарового світлопрозорого покриття з скла або синтетичної плівки є метою роботи. На сонячній установці, змонтованій на даху одного з пансіонатів, розташованого на Півдні України, на декількох теплоізолюваних корпусах, в яких були розміщені сонячні колектори, були встановлені наступні варіанти світлопрозорих покриттів: один шар скла; два шари скла; три шари скла; один шар поліетиленової плівки; один шар скла і один шар поліетиленової плівки; два шари поліетиленової плівки; один шар скла і два шари поліетиленової плівки. При роботі установки вимірювалися температури: теплоносія усередині сонячного колектора, повітря між сонячним колектором і світлопрозорим покриттям, стінок і днища корпусу. Експерименти проводилися при зміні витрати теплоносія від 0,5 до 3,5 м³/г. За експериментальними даними був виконаний розрахунок щільностей теплових потоків і ККД всіх вище перерахованих варіантів світлопрозорих покриттів, побудовані залежності щільностей теплових потоків і ККД від температури. Всі залежності апроксимовані рівняннями і визначені коефіцієнти кореляції. Отримані узагальнені залежності щільності теплового потоку і ККД від температури в сонячному колекторі при зміні витрати теплоносія від 0,5 до 3,5 м³/г залежно від пропускної спроможності різних варіантів світлопрозорого покриття.

Ключові слова: коефіцієнт корисної дії, щільність теплового потоку, сонячний колектор, сонячні установки, світлопрозоре покриття.

Ю. А. СЕЛИХОВ, В. А. КОЦАРЕНКО, І. Б. РЯБОВА, Е. А. ГАПОНОВА

ИНТЕГРАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА СВЕТОПРОЗРАЧНЫХ ПОКРЫТИЙ В СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Использование солнечной энергии - экологически чистый, энергосберегающий процесс. Введение в эксплуатацию солнечных установок улучшает экологическую ситуацию района за счет снижения объемов выбросов загрязняющих веществ, к которым относятся продукты сгорания традиционных видов энергии, - органического топлива. Об энергетической эффективности применения некоторых материалов как светопрозрачного покрытия, которое накрывает теплоизолированный корпус, в котором расположен солнечный коллектор, в технической литературе существуют разрозненные сведения. Применение других материалов и получение обобщенных зависимостей плотности теплового потока и коэффициента полезного действия (КПД) от температуры при изменении расхода теплоносителя в солнечном коллекторе в зависимости от пропускной способности одно- или многослойного светопрозрачного покрытия из стекла или синтетической пленки является целью работы. На солнечной установке, смонтированной на крыше одного из пансионатов, расположенного на Юге Украины, на нескольких теплоизолированных корпусах, в которых были размещены солнечные коллекторы, были установлены следующие варианты светопрозрачных покрытий: один слой стекла; два слоя стекла; три слоя стекла; один слой полиэтиленовой пленки; один слой стекла и один слой полиэтиленовой пленки; два слоя полиэтиленовой пленки; один слой стекла и два слоя полиэтиленовой пленки. При работе установки измерялись температуры: теплоносителя внутри солнечного коллектора, воздуха между солнечным коллектором и светопрозрачным покрытием, стенок и днища корпуса. Эксперименты проводились при изменении объемного расхода теплоносителя от 0,5 до 3,5 м³/ч. По экспериментальным данным был выполнен расчет плотностей тепловых потоков и КПД всех выше перечисленных вариантов светопрозрачных покрытий, построены зависимости плотности тепловых потоков и КПД от температуры. Все зависимости аппроксимированы уравнениями и определены коэффициенты корреляции.

Получены обобщенные зависимости плотности теплового потока и КПД от температуры в солнечном коллекторе при изменении объемного расхода теплоносителя от 0,5 до 3,5 м³/ч в зависимости от пропускной способности разных вариантов светопрозрачного покрытия.

Ключевые слова: коэффициент полезного действия, плотность теплового потока, солнечный коллектор, солнечные установки, светопрозрачное покрытие.

YU. A. SELIKHOV, V. A. KOTSARENKO, I. B. RYABOVA, E. A. GAPONOVA

INTEGRATION OF HEAT TRANSFER OF LIGHT-TRANSFER COATINGS IN SOLAR ENERGY

The use of solar energy is an environmentally friendly, energy-saving process. Putting into operation of solar installations improves the ecological situation of the region due to a decrease in emissions of pollutants, which include products of combustion of traditional types of energy - organic fuel. On the energy efficiency of using some materials as a translucent coating, which covers the thermally insulated casing, in which the solar collector is located, there are scattered information in technical literature. The use of other materials and obtaining generalized dependences of the heat flux density and efficiency on temperature when the coolant flow rate in a solar collector varies depending on the capacity of a single or multilayer translucent glass or synthetic film coating. In a solar installation mounted on the roof of one of the boarding houses located in the South of Ukraine, several heat-insulated coatings were installed on several insulated buildings in which solar collectors were placed: one layer of glass; two layers of glass; three layers of glass; one layer of plastic film; one layer of glass and one layer of plastic film; two layers of plastic film; one layer of glass and two layers of plastic film. During operation, the temperatures were measured: the coolant inside the solar collector, the air between the solar collector and the translucent coating, the walls and bottom of the housing. The experiments were carried out with a change in the volumetric flow rate of the coolant from 0,5 to 3,5 m³ / h. According to the experimental data, the calculation of the density of heat fluxes and the efficiency of all the above listed versions of translucent coatings was carried out, the dependences of the densities of heat fluxes and efficiency on temperature were constructed. All dependences are approximated by equations and correlation coefficients are determined. The generalized dependences of the heat flux density and efficiency on the temperature in the solar collector are obtained when the volumetric flow rate of the coolant varies from 0,5 to 3,5 m³ / h, depending on the transmittance of various translucent coating options.

Keywords: efficiency, heat flux density, solar collector, solar installations, translucent coating.

Ю. А. Селихов, В. О. Коцаренко, І. Б. Рябова, О. О. Гапонова, 2018

Постановка проблемы. В настоящее время накоплен достаточный опыт по разработке и эксплуатации систем горячего водо- и теплоснабжения, в которых солнечная энергия эффективно используется круглогодично. Применение нетрадиционных и возобновляемых источников энергии для выработки тепловой энергии может внести существенную помощь при решении энергетических, экономических, социальных и экологических проблем Украины. Кроме того, ввод в эксплуатацию солнечных установок улучшает экологическую ситуацию района потребления тепловой энергии за счет снижения объемов выбросов загрязняющих веществ, к которым относятся продукты сгорания органического топлива, используемого для производства тепловой энергии. Приход солнечной энергии на территорию Украины для разных сезонов года и регионов составляет примерно от 290 до 1200 кВт·ч/м². При этом максимальное солнечное излучение наблюдается на побережье Черного и Азовского морей. Кроме того, для прибрежных районов по данным метеорологических наблюдений среднегодовое количество солнечных дней составляет порядка 250. Приведенные данные подтверждают правильность концепции внедрения солнечных установок для получения тепловой низкопотенциальной энергии, которая используется для горячего водоснабжения и теплоснабжения объектов различного назначения. Реализация данной концепции возможна при таком варианте исполнения солнечных установок, когда затраты на выработку тепловой энергии с помощью этих установок будут ниже уровня суммарных затрат на получение тепловой энергии традиционными способами (в котельных установках). Одновременно с этим, срок окупаемости солнечных установок должен быть соизмерим с гарантийным сроком их эксплуатации. Для выполнения поставленных условий представляется целесообразным разработка таких конструкций солнечных коллекторов, которые позволяли бы минимизировать затраты на их изготовление, монтаж, обслуживание, а также обладали бы способностью поглощать как можно больше солнечной энергии и превращать ее в тепловую. Это может достигаться за счет использования дешёвых отечественных материалов, выпуск которых гарантирован в достаточных объемах на протяжении длительного срока.

Анализ последних исследований и публикаций. Наиболее широкое применение получили солнечные водонагревательные установки для сезонного и круглогодичного горячего водо- и теплоснабжения индивидуальных, коллективных и промышленных потребителей в сочетании с параллельно действующими тепловыми дублерами. Основными элементами солнечной водонагревательной установки являются: солнечный коллектор – устройство, где происходит преобразование лучистой энергии в тепловую; одно- или многослойное светопрозрачное покрытие из стекла или синтетической пленки; каркас – из металла, пластмассы, дерева, бетона и других материалов, в котором размещается солнечный коллектор, тщательно изолируемый от боковых стенок и дна каркаса. Энер-

гия, поглощаемая солнечным коллектором, зависит от угла падения радиации на солнечный коллектор, соотношения между прямой и рассеянной радиацией, оптических свойств светопрозрачного покрытия, его запыления, отражательной способности солнечного коллектора и т. д. Для бытового горячего водоснабжения рекомендуется использовать одностекольную защиту, для отопления помещений обычно оправдано применение двух слоев стекла, в системах абсорбционного охлаждения из-за более высокого температурного уровня в генераторе требуется три слоя или применение селективного черного покрытия. Солнечная энергия, проникающая через светопрозрачное покрытие в солнечный коллектор, поглощается его поверхностью, в результате чего температура его повышается. По мере повышения температуры внутри коллектора вследствие теплообмена с окружающей средой путем конвекции, теплопроводности, излучения начинают расти тепловые потери до предельного уровня, определяемого конструктивными особенностями солнечной водонагревательной установки. Количество солнечной радиации, поступающей в коллектор, превышает тепловые потери, поэтому температура поверхности солнечного коллектора растет до наступления термодинамического равновесия. В плоских солнечных коллекторах поверхность, воспринимающая солнечное излучение, является одновременно поверхностью, поглощающей солнечное излучение. Плоские коллекторы применяются для нагрева теплоносителя до температур, не превышающих температуру окружающей среды более чем на 100 градусов Цельсия. Солнечные лучи, проходя сквозь светопрозрачное покрытие и попадая на зачерненную поверхность солнечного коллектора, нагревают последнюю, тепло от которой передается теплоносителю, протекающему в полости солнечного коллектора. Не говоря о геометрических формах и размерах солнечные водонагреватели различаются по количеству светопрозрачных покрытий и материалов, из которых эти покрытия выполнены, по типу солнечных коллекторов и характеру организованного в них движения теплоносителя, по типу используемых в качестве изоляции материалов. Об энергетической эффективности применения вышеуказанных вариантов светопрозрачного покрытия в технической литературе существуют разрозненные сведения. Применение различных материалов и получение обобщенных зависимостей: коэффициента полезного действия, удельного теплового потока от времени суток при изменении расхода теплоносителя в солнечном коллекторе в зависимости от пропускной способности одно- или многослойного светопрозрачного покрытия из стекла или синтетической пленки является целью работы.

Цель статьи. В мировой практике уже накоплен позитивный опыт по разработке, созданию и практическому применению солнечных водонагревательных установок, используемых самостоятельно или комплексно – в системах теплоснабжения и горячего водоснабжения индивидуальных и коллективных потребителей. Снижение энергозатрат и дорогого топлива при производстве горячего водоснабжения и тепло-

снабжения имеют также большое практическое значение. Поэтому считаем, что тема статьи – актуальна.

В работе представлены результаты собственных теоретических и экспериментальных исследований, выполненных относительно солнечных коллекторов, разработанных самими авторами.

На солнечной установке, установленной на крыше одного из пансионатов Юга Украины [1, 2] на нескольких теплоизолированных корпусах, в которых были расположены солнечные коллектора, были установлены следующие варианты светопрозрачных покрытий: 1 – один слой стекла [3]; 2 – два слоя стекла; 3 – прозрачная поливинилхлоридная пленка; 4 – полупрозрачная поливинилхлоридная пленка; 5 – один слой полиэтиленовой пленки [4]; 6 – два слоя полиэтиленовой пленки. При работе установки измерялись температуры: теплоносителя на входе в солнечный коллектор и на выходе из него, воздуха между солнечным коллектором и светопрозрачным покрытием, стенок и днища корпуса [5]. Эксперименты проводились при изменении расхода теплоносителя от 0,5 до 3,5 м³/ч. По экспериментальным данным были выполнены расчеты: коэффициента полезного действия, плотностей тепловых потоков [6] всех выше перечисленных вариантов светопрозрачного покрытия; построены зависимости: коэффициента полезного действия, плотностей тепловых потоков от времени суток.

При анализе экспериментальных данных с целью представления в аналитическом виде функциональной зависимости, т. е. в подборе формулы, описывающей результаты эксперимента, были использованы возможности надстройки среды Excel (пакет анализа), а именно регрессионный анализ [7]. Все зависимости аппроксимированы обобщенными уравнениями и определены коэффициенты корреляции [8].

Ниже приведены обобщенные уравнения, описывающие $q = f(t)$. Номера в скобках соответствуют выше перечисленным номерам при перечислении вариантов светопрозрачных покрытий – это обобщенные уравнения для всех восьми вариантов светопрозрачных покрытий при $V = const$:

$$V = 0,5 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$q = -0,0035 \cdot t^2 + 0,0946 \cdot t - 0,4442, \quad (1)$$

$$V = 1,0 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$q = -0,0074 \cdot t^2 + 0,1976 \cdot t - 0,9282, \quad (2)$$

$$V = 1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$q = -0,0106 \cdot t^2 + 0,2838 \cdot t - 1,3334, \quad (3)$$

$$V = 2,0 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$q = -0,0141 \cdot t^2 + 0,3781 \cdot t - 1,7776, \quad (4)$$

$$V = 2,5 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$q = -0,0176 \cdot t^2 + 0,4729 \cdot t - 2,2219, \quad (5)$$

$$V = 3,5 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$q = -0,0211 \cdot t^2 + 0,5675 \cdot t - 2,6661, \quad (6)$$

где η – коэффициент полезного действия; q – удельная плотность теплового потока, кВт/м²; t – время суток, час; V – объемный расход теплоносителя, м³/ч.

Обобщенное уравнение для всех шести вариантов светопрозрачных покрытий от $V = 0,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ до $V = 3,5 \text{ м}^3/\text{ч}$, описывающее $\eta = f(t)$:

$$\eta = -0,0081 \cdot t^2 + 0,2086 \cdot t - 0,9801, \quad (7)$$

где $R^2 = 0,94$ – коэффициент корреляции для всех уравнений. Как видно при анализе коэффициентов корреляции погрешность расчетов не превышает 6 %.

Выводы. 1. Получены обобщенные зависимости: коэффициента полезного действия, плотности теплового потока от времени суток при изменении расхода теплоносителя в солнечном коллекторе от 0,5 до 3,5 м³/ч в зависимости от пропускной способности различных вариантов светопрозрачного покрытия. Погрешность расчетов не превышает 6 %.

2. Проведенные исследования показали, что для всех типов полимерных материалов при разных объемных расходах V от 0,5 до 3,5 м³/ч теплоносителя можно рассчитать: плотность теплового потока по условиям теплообмена на входе в коллектор; максимальный коэффициент полезного действия по максимальной плотности теплового потока и расходу теплоносителя.

3. Натурные испытания показали, что коллектор из полимерного материала наиболее полно поглощает тепло солнечного излучения, это приводит к нагреву теплоносителя до более высоких температур (90 °С) по сравнению с конструкциями солнечных коллекторов, изготовленных из разных металлов (63 °С).

4. Применение солнечных коллекторов из полимерных материалов позволяет уменьшить: себестоимость получаемой тепловой энергии; материалоемкость солнечной установки; срок окупаемости солнечной установки; упростить схему ее работы; усовершенствовать действующие солнечные установки.

Список литературы

1. Селихов Ю. А., Ведь В. Е., Бухкало С. И., Костин В. М. Конструкционные особенности увеличения эффективности работы гелиоустановок. Экотехнологии и ресурсосбережение. Киев: Типография НАН Украины, № 3, 2004. С. 70–75.
2. Гелиоводонагрівник. Патент України № 75178, Бюл. № 3, 2006.
3. Yuriy A. Selikhov, Victor A. Kotsarenko, Jiří J. Klemeš, Petro O. Kapustenko/ The Performance of Plastic Solar Collector as Part of Two Contours Solar Unit/ CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS Vol. 70, 2018, С. 2053–2058, Copyright © 2018, AIDIServizi S.r.l.
4. Полімерна композиція. Патент України № 72078 А, Бюл. № 1, 2005.
5. Селихов Ю. А., Коцаренко В. А. Интеграция процесса теплообмена солнечной установки. Наукові праці ОНАПТ, Том 82, Вип. 1, С. 87–93, ОНАХТ, Одесса, 2018.
6. Даффи Дж., Бекман У. А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. – М: Мир, – 1977. – 420 с.
7. Додж М., Стинсон К. Эффективная работа с Microsoft Excel 2000. – СПб.: Питер, 2001. – 1056 с.
8. Коцаренко В. О., Селихов Ю. А., Горбунов К. О. Розрахунки в середовищі Excel: навч. посіб. Харків: Вид-во «Підручник НТУ «ХПІ», 2011. 272 с.

References (transliterated)

1. Selikhov Yu. A., Ved V.E., Bukhkalov S. I., Kostin V. M. Constructive features of increasing the efficiency of heliostations. Ekotekhnologii i resursosberezhenie. Kiev: Tipografiya NAN Ukrainy. №3 2004. S.70–75.

2. Geliiodonagrivnyk: pat. № 75178 Ukrainy. № 2004021010 ; zayavl. 12.02.2004 ; opubl. 15.03.2006, Byul. № 3, 120 s.
3. Yuriy A. Selikhov, Victor A. Kotsarenko, Jifi J. Klemeš, Petro O. Kapustenko/ The Performance of Plastic Solar Collector as Part of Two Contours Solar Unit/ CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS VOL. 70, 2018, P. 2053–2058, Copyright © 2018, AIDIServizi S.r.l.
4. Polimerna kompozitsiya: pat. № 72078 A Ukrainy. №2003088001; zayavl. 27.08.2003; opubl.17.01.2005, Byul. № 1. 110 s.
5. Selikhov Yu. A., Kotsarenko V.A. Integration of the heat exchange process of a solar installation. Scientific works ONAFT, Volume 82, Vip. 1, pp.87–93, ONAFT, Odessa, 2018.
6. Dzh., Bekman U.A. Teplovye protsesy s ispolzovaniem solnechoy energii. M: Mir, 1977. 420 s.
7. Dodge M., Stinson K. Effective work with Microsoft Excel 2000. SPb.: Peter, 2001. 1056 p.
8. Kotsarenko V.O., Selikhov Yu. A., Gorbunov K.O. Rozrakhky v seredovyschi Excel: navch. Posib. Kharkiv: Vyd-vo «Pidruchnyk NTY «KhPI», 2011. 272 s.

Надійшло (received) 21.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Селихов Юрій Анатолійович (Селихов Юрий Анатольевич, Selikhov Yury Anatolevich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет (Харківський політехнічний інститут), професор кафедри інтегрованих технологій. процесів та апаратів, м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8679-2752>; e-mail: syua2016@ukr.net.

Коцаренко Віктор Олексійович (Коцаренко Виктор Алексеевич, Kotsarenko Viktor Alekseevich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет (Харківський політехнічний інститут), професор кафедри інтегрованих технологій. процесів та апаратів, м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8788-689X>; e-mail: viktor.kotsa@gmail.com.

Рябова Ірина Борисівна (Рябова Ирина Борисовна, Ryabova Irina Borisovna) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет (Харківський політехнічний інститут), професор кафедри інтегрованих технологій. процесів та апаратів, м. Харків.

Гапонова Олена Олександрівна (Гапонова Елена Александровна, Gaponova Elena Alexandrovna) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет (Харківський політехнічний інститут), доцент кафедри інтегрованих технологій. процесів та апаратів, м. Харків, e-mail: czn.ntu.hpi@ukr.net.