



СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

SOLAR ENERGY

СОЛНЕЧНЫЕ КОЛЛЕКТОРЫ

SOLAR COLLECTORS

Статья поступила в редакцию 02.09.16. Ред. рег. № 799-1228-2-SM The article has entered in publishing office 02.09.16. Ed. reg. No. 799-1228-2-SM

УДК 662.447:536.24

ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ ПЛОСКОГО СОЛНЕЧНОГО
ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНОГО КОЛЛЕКТОРА

Р.Р. Аvezov^{1,2}, Н.Р. Аvezova^{1,2}, Э.Ю. Рахимов²

¹Международный институт солнечной энергии

корп. 2, д. 2б, ул. Бодомзор йули, Ташкент, 100084, Республика Узбекистан
тел.: (+998) 71 235-40-90; факс: (+998) 71 235-03-77; e-mail: avezov@uzsci.net

²Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз
д. 2б, ул. Бодомзор йули, Ташкент, 100084, Республика Узбекистан
тел.: (+998) 71 235-42-42; факс: (+998) 71 233-12-71; e-mail: avezov@uzsci.net

doi: 10.15518/isjaee.2016.23-24.012-020

Заключение совета рецензентов: 15.09.16 Заключение совета экспертов: 27.09.16 Принято к публикации: 05.10.16

Предложена тепловая модель плоского солнечного водонагревательного коллектора (ПСВК) для определения его удельной теплопроизводительности в зависимости от заранее заданного значения температуры получаемой горячей воды. В отличие от существующих в мировой практике тепловых моделей ПСВК, в предлагаемой модели впервые использованы полученные авторами результаты исследований по определению среднemasсовой температуры теплоносителя (воды), коэффициента тепловой эффективности и средней рабочей температуры поверхности лучепоглощающих теплообменных панелей (ЛПП) бесконтактным методом в зависимости от эффективного коэффициента тепловых потерь. В определении коэффициента тепловых потерь учтено влияние частичного поглощения и преобразования в тепло проходящего через светопрозрачное покрытие корпуса коллектора суммарного солнечного излучения, а также значение средней рабочей температуры поверхности ЛПП и температуры окружающей среды. Приведен практический пример реализации предложенной модели и доказана ее достоверность.

Ключевые слова: солнечное излучение; плоский солнечный водонагревательный коллектор; лучепоглощающая теплообменная панель; теплоотводящий канал; светопрозрачное покрытие; тепловая модель.

THE THERMAL MODEL
OF A FLAT-PLATE SOLAR WATER-HEATING COLLECTOR

R.R. Avezov^{1,2}, N.R. Avezova^{1,2}, E.Yu. Rakhimov²

¹International Solar Energy Institute

bid. 2, 2b Bodomzor Yuli str., Tashkent, 100084, the Republic Uzbekistan
tel.: (+998) 71 235-40-90; факс: (+998) 71 235-03-77; e-mail: avezov@uzsci.net

²Physical-Technical Institute, SPA "Physics-Sun", Uzbek Academy of Sciences
2b Bodomzor Yuli str., Tashkent, 100084, the Republic Uzbekistan
tel.: (+998) 71 235-42-42; факс: (+998) 71 233-12-71; e-mail: avezov@uzsci.net

doi: 10.15518/isjaee.2016.23-24.012-020



The paper offers a thermal model to determine the specific heat productivity of flat-plate solar water-heating collector (FSWHC) depending on the pre-assigned temperature values of obtaining hot water. Unlike existing thermal models of FSWHC, for the first time in the proposed model the research results obtained by the authors are used to determine the average mass temperature of the heat-transfer (water) collectors, heat efficiency coefficient and the surface average working temperature of the light-absorbing heat-exchange panels (LAHP) by non-contact method, depending on the effective coefficient of LAHP heat losses. In order to determine the coefficient we have to take into account the partial absorption influence and conversion into heat of the total solar radiation passing through translucent cover of collector case and also the value of the LAHP surface average working and ambient temperature. It is provided a practical example of realization and proved authenticity of the model.

Keywords: solar radiation; flat-plate solar water-heating collector; light-absorbing heat-exchange panel; heat-removing channel; translucent cover; thermal model.



*Раббанакул Рахманович
Авезов
Rabbanakul Avezov*

Сведения об авторе: д-р тех. наук, проф. глав. науч. сотрудник лаборатории солнечных тепловых и энергетических установок, Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз; глав. науч. сотрудник отдела «Солнечное теплоснабжение», Международный институт солнечной энергии.

Образование: Бухарский государственный педагогический институт, учитель физики (1965 г.).

Область научных интересов: тепловое преобразование и использование солнечной энергии; возобновляемые источники энергии.

Публикация: более 350.

Information about the author: D.Sc. (engineering), Chief Researcher of Solar Thermal and Power Installation Laboratory, Physical-Technical Institute of the SPA "Physics-Sun", Uzbek Academy of Sciences; Chief Researcher of Department of "Solar Heat Supply", International Solar Energy Institute.

Education: Bukhara State Pedagogical Institute (teacher of physics), 1965.

Research area: the thermal conversion and use of solar energy; renewable energy sources.

Publications: more than 350.



*Нилуфар Раббанакулловна
Авезова
Nilufar Avezova*

Сведения об авторе: канд. тех. наук, вед. науч. сотрудник, начальник отдела «Солнечное теплоснабжение», Международный институт солнечной энергии; заведующий лабораторией солнечных тепловых и энергетических установок, Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз.

Образование: Ташкентский государственный университет, математик (1994 г.).

Область научных интересов: тепловое преобразование и использование солнечной энергии; возобновляемые источники энергии.

Публикация: более 120.

Information about the author: Ph.D. (engineering), Leading Researcher, Head of Department of "Solar Heat Supply", International Solar Energy Institute; Head of Solar Thermal and Power Installation Laboratory, Physical-Technical Institute of the SPA "Physics-Sun", Uzbek Academy of Sciences.

Education: Tashkent State University (mathematician), 1994.

Research area: the thermal conversion and use of solar energy; renewable energy sources.

Publications: more than 120.



*Эргашали Юлдашевич Рахимов
Ergashali Rakhimov*

Сведения об авторе: млад. науч. сотрудник лаборатории солнечных тепловых и энергетических установок, Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз.

Образование: Национальный университет Узбекистана им. Мирза Улугбека, радиофизик, физик (2011 г.).

Область научных интересов: радиофизика; оптика; возобновляемые источники энергии.

Публикация: 25.

Information about the author: Junior Researcher of Solar Thermal and Power Installation Laboratory, Physical-Technical Institute of the SPA "Physics-Sun", Uzbek Academy of Sciences.

Education: National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek (physicist, radio physicist), 2011.

Research area: radio physics; optics; renewable energy sources.

Publications: 25.



Список обозначений	
<u>Буквы греческого алфавита</u>	
α	Коэффициент теплообмена, коэффициент поглощения СИ
β	Коэффициент объемного расширения
η	Тепловая эффективность
ϑ	Скорость
ρ	Плотность, коэффициент отражения солнечного излучения
τ	Коэффициент пропускания СИ
<u>Буквы латинского алфавита</u>	
c	Удельная теплоемкость
G	Массовый расход теплоносителя
F	Площадь поверхности
K	Коэффициент теплопередачи, коэффициент тепловых потерь
\dot{m}	Удельный массовый расход теплоносителя
Q	Суммарная удельная теплопроизводительность коллектора
q	Поверхностная плотность потока тепла
T, t	Температура
<u>Индексы верхние</u>	
Σ	Суммарный
dif	Диффузное (Diffuse)
dir	Прямое (Direct)
day	Дневной (Day)
eff	Эффективный (Effective)
$hourly$	Часовой (Hourly)
$monthly$	Месячный (Monthly)
wsy	Теплый период года (Warm season of year)
$yearly$	Годовой (Yearly)
<u>Индексы нижние</u>	
a	Окружающая среда (Ambient)
abs	Поглощенное (Absorbing)
br	Приведенный (Bringing)
cw	Прохладная вода (Cool water)
hw	Горячая вода (Hot water)
dd	Пыль и грязь (Dust and dirt)
$fall$	Падающее (Falling)
$fill$	Заполнение (Filling)
fr	Фронтальная (Frontal)
g	Стекло (Glass)
hp	Теплообменная панель (Heat exchange panel)
out	Наружный (Outer)
p	Поверхность ЛПТП (Surface LHP)
tc	Светопрозрачное покрытие (Translucent cover)
us	Полезный (Useful)
w	Вода (Water)
<u>Индексы вторичные нижние</u>	
ar	Арифметические (Arithmetical)
$p-a$	Между поверхностью ЛПТП и окружающей средой (Between the LHP surface and the ambient surface)
$g-a$	Между наружной поверхностью светопрозрачного покрытия и окружающей средой (Between the outer surface of translucent cover and the environment)
l	Длина канала
<u>Единицы измерения</u>	
$Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$	Ватт на квадратный метр за градус
$Вт/м^2$	Ватт на квадратный метр
$кг/м^3$	Килограмм на кубический метр
$кг/(м^2 \cdot час)$	Килограмм на квадратный метр за час
$МДж/(м^2 \cdot год)$	Мегаджоуль на квадратный метр за год
$Дж/(кг \cdot ^\circ C)$	Джоуль на килограмм за градус
$^\circ C$	Градус Цельсия
<u>Аббревиатуры</u>	
ВИЭ	Возобновляемые источники энергии
ЛПТП	Лучепоглощающая теплообменная панель
ПСВК	Плоский солнечный водонагревательный коллектор



Продолжение списка обозначений

СГВС	Система горячего водоснабжения
СИ	Солнечное излучение
СП	Светопрозрачное покрытие
СЭ	Солнечная энергия
ТОК	Теплоотводящий канал

Введение

На современном этапе развития экономики Республики Узбекистан использование нетрадиционных и возобновляемых источников энергии актуально как для обеспечения энергетической безопасности, так и для улучшения социально-бытовых условий населения. Немаловажное значение при этом имеет возможность сохранения запасов углеводородного топлива для будущих поколений и смягчение экологической обстановки.

Основными компонентами возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в Узбекистане являются: солнечная, гидравлическая, ветровая и геотермальная энергия, а также энергия биомассы. Согласно результатам проведенных исследований, технический потенциал ВИЭ в Республике Узбекистан составляет 270 млн т у.т., что более чем в три раза превышает ежегодную потребность в энергоресурсах [1].

В связи с тем, что в Узбекистане 98,55 % технического потенциала ВИЭ приходится на долю солнечной энергии (СЭ), она считается определяющим фактором при планировании доли возобновляемых источников энергии в общем энергобалансе.

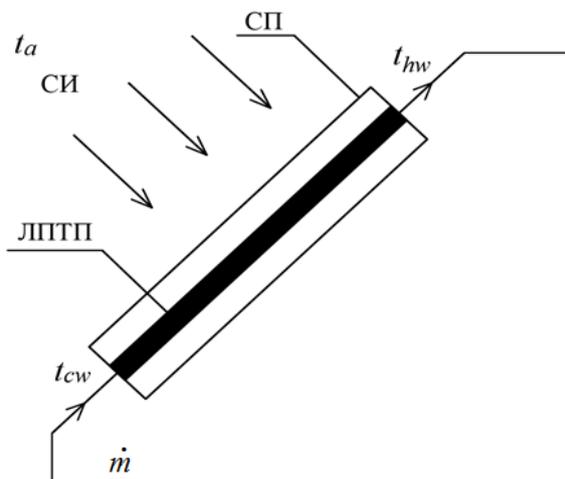


Рис. Принципиальная схема плоского солнечного водонагревательного коллектора
Fig. Schematic diagram of a flat-plate solar water-heating collector

Одна из наиболее подготовленных сфер широкомасштабного применения СЭ в отраслях экономики Узбекистана, как и во всем мире, – это преобразование ее в низкопотенциальное тепло с помощью плоского солнечного водонагревательного коллектора (ПСВК) (рис.) и использование последнего в качестве

альтернативного источника энергии в системах горячего водоснабжения (СГВС) жилых, коммунально-бытовых и социальных объектов, являющихся основными потребителями тепла такого же температурного потенциала.

Анализ и обобщение мирового опыта в этой области показывают, что реальные масштабы использования СЭ в СГВС при прочих равных условиях (климатические условия) зависят от технико-экономических показателей их основного элемента – ПСВК, на долю которого приходится более 60 % суммарных затрат. Технико-экономические показатели ПСВК, как правило, наряду с удельными затратами, обусловлены их удельной годовой теплопроизводительностью (Q_{us}^{year}), зависящей в свою очередь от температуры получаемой горячей воды (t_{hw}).

Мгновенное значение удельной теплопроизводительности ПСВК (q_{us}), на основе суммирования (за час, день, месяц, сезон или год) которой и по результатам теплового тестирования ПСВК в натуральных условиях определяются соответствующие значения среднечасовой ($Q_{us_i}^{hour}$), среднедневной ($Q_{us_i}^{day}$), среднемесячной ($Q_{us_i}^{month}$), сезонной ($Q_{us_i}^{wsy}$) или годовой ($Q_{us_i}^{year}$) удельной теплопроизводительности, может быть определено из следующего выражения:

$$q_{us} = (\dot{m} c_p)_w (t_{hw} - t_{cw}), \quad (1)$$

где

$$\dot{m}_w = \frac{G_w}{F_{fr}}, \quad (2)$$

\dot{m} – удельный массовый расход теплоносителя; F_{fr} – площадь фронтальной поверхности ПСВК; G_w – расход воды через данный коллектор; $c_{pw} = 4186,8$ Дж/(кг·°С) – удельная теплоемкость воды; t_{cw} и t_{hw} – температура холодной (исходной) воды на входе в коллектор и на выходе из него соответственно.

В связи с тем, что значение q_{us} в течение светового дня в зависимости от изменения прихода СИ и температуры окружающей среды (t_a) изменяется существенно, для поддержания значения t_{hw} на требуемом уровне необходимо обеспечить соответствующее изменение мгновенного значения \dot{m}_w в течение дня.



Если учесть хаотичность изменения мгновенных значений прихода солнечного излучения (СИ) и температуры окружающей среды в течение дня и, соответственно, месяцев года, определение значения q_{us} в зависимости от t_{hw} на основе натуральных экспериментов очень трудоёмко и требует много времени (2–3 года) из-за разновременности и отличающихся условий их проведения.

Таким образом, для того чтобы определить значение q_{us} в ПСВК, в последние годы моделируются режимы их работы на основе усредненных долгосрочных актинометрических и метеорологических данных местностей по заданным значениям оптических параметров их элементов, определенных в лабораторных условиях.

Тепловые модели ПСВК

Простейшими одноэлементными тепловыми моделями ПСВК для определения мгновенного значения удельной теплопроизводительности (q_{us}), в которых пренебрегают их теплоемкостью (нулевая теплоемкость), являются модели, предложенные В.Б. Вейнбергом и Б.В. Петуховым [2, 3], а также Г.К. Хоттелем, А. Уиллером и Р.У. Блиссом [4–6].

Согласно [2, 3], значение q_{us} ПСВК может быть определено из уравнения его теплового баланса:

$$q_{us} = q_{abs_p}^{\Sigma} - K_{br_{p-a}} \cdot (\bar{t}_p - t_a), \quad (3)$$

которое является выражением тепловой модели ПСВК Вейнберга – Петухова.

В выражении (3) $q_{abs_p}^{\Sigma}$ – поверхностная плотность потока суммарного (прямого и диффузного) СИ, поглощенного зачерненной поверхностью ЛПТП рассматриваемого коллектора; $K_{br_{p-a}}$ – приведенный к единице площади фронтальной поверхности корпуса ПСВК (F_{fr}) коэффициент суммарных (конвективных и лучистых) тепловых потерь ЛПТП в окружающую среду; \bar{t}_p – средняя рабочая температура ЛПТП; t_a – температура окружающей среды.

Значение $K_{br_{p-a}}$ в (3) при прочих равных условиях (скорость ветра ϑ и температура небосвода t_{sd}) зависит от \bar{t}_p и t_a , а \bar{t}_p – в свою очередь от $q_{abs_p}^{\Sigma}$, $K_{br_{p-a}}$, t_a , средней массовой температуры воды в ТОК ЛПТП (\bar{t}_w) и ее удельного расхода через данный коллектор (\dot{m}_w). Значение \bar{t}_w при прочих равных условиях зависит от мгновенных значений t_{cw} , t_{hw} , \dot{m}_w , $q_{abs_p}^{\Sigma}$, $K_{br_{p-a}}$, \bar{t}_p и t_a .

В связи с наличием такой сложной взаимосвязи между перечисленными параметрами, тепловая модель ПСВК Вейнберга – Петухова без соответст-

вующего учета внутренних функциональных зависимостей между ними не может быть использована для определения значения q_{us} в зависимости от t_{hw} , что является ее главным недостатком.

В тепловой модели ПСВК Хоттеля – Уиллера – Блисса [4–6] за счет введения в балансовые уравнения коэффициента тепловой эффективности ЛПТП (η_{hp}), характеризующего эффективность передачи тепла от ее элементов к нагреваемой в ТОК воде [7], выражение для определения q_{us} представлено в виде:

$$q_{us} = \eta_{hp} \left[q_{abs_p}^{\Sigma} - K_{br_{p-a}} \cdot (\bar{t}_w - t_a) \right]. \quad (4)$$

Значение η_{hp} в (4) при прочих равных условиях (конструкция, геометрические размеры и теплофизические свойства материалов изготовления ЛПТП) зависит от \dot{m}_w , $K_{br_{p-a}}$ и \bar{t}_w . В рамках тепловой модели Хоттеля – Уиллера – Блисса значение η_{hp} предполагалось определять по результатам теплового тестирования рассматриваемого ПСВК в натуральных квазистационарных условиях [8]. Однако в данном случае можно лишь определить значение произведения $\eta_{hp} K_{br_{p-a}}$, а не значения η_{hp} и $K_{br_{p-a}}$ отдельно. Значение $K_{br_{p-a}}$ в (4), так же как и в (3), зависит от ϑ , t_{sd} , \bar{t}_p и t_a . Для определения значения \bar{t}_w в тепловой модели Хоттеля – Уиллера – Блисса, вместо усредненного по длине ТОК ЛПТП значения средней массовой температуры воды (\bar{t}_w), допускается использование ее среднеарифметического значения, определяемого из

$$\bar{t}_{w_{ar}} = 0,5(t_{cw} + t_{hw}). \quad (5)$$

Однако, как показывают результаты исследования [9], значение $\bar{t}_{w_{ar}}$, найденное в (5), при значениях $\dot{m}_w = 8 \div 10$ кг/(м²·час) на 4–5 % ниже ее реального значения, т.е. \bar{t}_{w_g} . Следует отметить, что как и в тепловой модели Вейнберга – Петухова, так и в модели Хоттеля – Уиллера – Блисса без учета внутренних функциональных зависимостей между параметрами и допущения (5) определение q_{us} в зависимости от t_{hw} невозможно.

Кроме того, общим недостатком тепловых моделей ПСВК Вейнберга – Петухова и Хоттеля – Уиллера – Блисса является пренебрежение частичным поглощением и преобразованием в тепло СИ, проходящего через светопрозрачное покрытие (СП) корпуса рассматриваемого коллектора (включая отраженный от зачерненной поверхности ЛПТП СИ), приводящее к существенным погрешностям расчетов по определению значения q_{us} .



Новая тепловая модель ПСВК

Для определения мгновенного значения q_{us} в зависимости от t_{hw} авторами данной статьи предложена новая тепловая (математическая) модель ПСВК, состоящая из системы уравнений (1):

$$q_{us} = q_{abs_p}^{\Sigma} - K_{br_{p-a}}^{eff} \cdot (\bar{t}_{p_{eff}} - t_a) \quad (6)$$

и

$$q_{us} = \eta_{hp} \left[q_{abs_p}^{\Sigma} - K_{br_{p-a}}^{eff} \cdot (\bar{t}_{w_i} - t_a) \right], \quad (7)$$

$$K_{br_{p-a}}^{eff} = (4,2501 + 0,0218 \cdot \bar{t}_{p_{eff}} + 0,0117 \cdot t_a) \cdot \left[1 - \frac{\beta_g}{(\bar{t}_{p_{eff}} - t_0)} \right] + 1,5925, \text{ Вт / м}^2 \cdot \text{°С} \quad (8)$$

и

$$\begin{aligned} \bar{t}_{p_{eff}} = & 22,9358 \{ [(5,8426 - 0,0101t_a - 0,0218\beta_g)^2 + 0,0872((5,8426 + 0,0177\beta_g)t_0 + \\ & + 4,2501\beta_g + 0,0117t_0^2 + q_{abs_p}^{\Sigma} - (\dot{m}c_p)_w(t_{hw} - t_{cw}))]^{0,5} - 5,8426 + 0,0101t_a + 0,0218\beta_g \}, \text{°С}, \end{aligned} \quad (9)$$

в которых

$$A = 2,36 \cdot 10^{-3} \cdot q_{fall_g}^{\Sigma} \cdot \frac{\rho_{p_{eff}} + 0,9485}{\alpha_{out_{g_2-o}}^{\Sigma}}, \text{ м}^2 \cdot \text{°С}, \quad (10)$$

где β_g – коэффициент ослабления (экстинкции) СИ материала СП; $\rho_{p_{eff}}$ – эффективный коэффициент отражения суммарного СИ зачерненной поверхности ЛТПП; $q_{fall_g}^{\Sigma}$ – поверхностная плотность потока суммарного (прямого и диффузного) СИ, падающего на плоскость фронтальной поверхности СП корпуса ПСВК; $\alpha_{out_{g_2-o}}^{\Sigma}$ – суммарный (конвективный и лучистый) коэффициент теплообмена между наружной поверхностью СП и окружающей средой и предметами (здания, деревья, небосвод и т.п).

Аппроксимационные выражения (8) и (9) получены на основе совместного рассмотрения и решения системы уравнений (6) и (7) с учетом зависимости $K_{br_{p-a}}^{eff}$ от $\bar{t}_{p_{eff}}$ и t_a в интервалах их изменения $30 \text{ °С} \leq \bar{t}_{p_{eff}} \leq 80 \text{ °С}$ и $15 \text{ °С} \leq t_a \leq 40 \text{ °С}$, которые характерны для средних условий эксплуатации ПСВК. Значение температуры СП, через которое верхняя поверхность ЛТПП изолируется от окружающей среды, определялась итерационным способом. Полученные результаты обрабатывались в виде искомых зависимостей методом наименьших квадратов.

в которой, в отличие от тепловых моделей ПСВК по Вейнбергу – Петухову и Хоттелю – Уиллеру – Блису, учтено влияние частичного поглощения и преобразования в тепло СИ, проходящего через СП корпуса на величину, равную q_{us} .

При реализации предложенной модели, т.е. системы уравнений (1), (6) и (7), используются впервые полученные авторами данной статьи выражения по определению эффективных значений $K_{br_{p-a}}$ и \bar{t}_p (т.е.

$K_{br_{p-a}}^{eff}$ и $\bar{t}_{p_{eff}}$) [9–12], через которые учитывается влияние частичного поглощения и преобразования тепла, проходящего через СП:

Для определения значений η_{hp} и \bar{t}_{w_i} (вместо выражения (5)), входящих в (7), также используются впервые полученные выражения [12]:

$$\eta_{hp} = \frac{(\dot{m}c_p)_w}{K_{br_{p-a}}^{eff}} \cdot \ln \frac{\frac{q_{abs_p}^{\Sigma}}{K_{br_{p-a}}^{eff}} + t_a - t_{cw}}{\frac{q_{abs_p}^{\Sigma}}{K_{br_{p-a}}^{eff}} + t_a - t_{hw}}} \quad (11)$$

и

$$\bar{t}_{w_i} = \frac{q_{abs_p}^{\Sigma}}{K_{br_{p-a}}^{eff}} + t_a - (t_{hw} - t_{cw}) \cdot \left[\frac{\frac{q_{abs_p}^{\Sigma}}{K_{br_{p-a}}^{eff}} + t_a - t_{cw}}{\frac{q_{abs_p}^{\Sigma}}{K_{br_{p-a}}^{eff}} + t_a - t_{hw}}} \right]^{-1}. \quad (12)$$

При этом значения t_a , $q_{fall_g}^{\Sigma}$, β_g , $\rho_{p_{eff}}$ и $\alpha_{out_{g_2-o}}^{\Sigma}$, входящие в (8)–(11) как внешние факторы, считаются заданными. Значение $q_{abs_p}^{\Sigma}$, так же как один из заданных внешних факторов, определяется из выражения:

$$q_{abs_p}^{\Sigma} = q_{abs_p}^{dir} + q_{abs_p}^{dif} = (\alpha_p \tau_{ic})_{eff}^{dir} q_{fall_g}^{dir} + (\alpha_p \tau_{ic})_{eff}^{dif} q_{fall_g}^{dif}, \quad (13)$$

где $q_{abs_p}^{dir}$ и $q_{abs_p}^{dif}$ – поверхностные плотности потоков соответственно прямого и диффузного СИ, поглощенного зачерненной поверхностью ЛТПП; $q_{fall_g}^{dir}$ и



$q_{fall_g}^{dif}$ – поверхностные плотности потоков прямого и диффузного СИ, падающего на плоскость фронтальной поверхности СП корпуса ПСВК; $(\alpha_p \tau_{ic})_{eff}^{dir}$ и $(\alpha_p \tau_{ic})_{eff}^{dif}$ – эффективные поглощательные способности зачерненной поверхности ЛПТП прямого и диффузного СИ, в которых учтены многократные внутренние отражения СИ между границами разделов СП и замкнутой воздушной прослойки (т.е. между зачерненной поверхностью ЛПТП и внутренней поверхностью СП), а также затенение поверхности ЛПТП боковыми стенками корпуса ПСВК; α_p^{dir} , α_p^{dif} – коэффициенты поглощения зачерненной поверхности ЛПТП прямого и диффузного СИ; τ_{ic}^{dir} , τ_{ic}^{dif} – коэффициенты пропускания СП корпуса ПСВК прямого и диффузного СИ, в которых учтены коэффициенты пропускания СИ через слой пыли и грязи на наружной поверхности СП (τ_{dd}) и заполнения данного коллектора (K_{fill}), определяемого из отношения площади лицевой поверхности ЛПТП (F_{hep}) к площади фронтальной поверхности корпуса ПСВК (F_{fr}), т.е.

$$K_{fill} = \frac{F_{hep}}{F_{fr}}. \quad (14)$$

Система уравнений (1), (6) и (7) с учетом выражений (9)–(13) представляет основу предложенной математической модели ПСВК.

Порядок реализации предложенной тепловой модели ПСВК

Реализация предложенной тепловой модели ПСВК осуществляется в следующей последовательности [13]:

1. При фиксированном (постоянном) значении t_{cw} задается наперед заданным значением t_{hw} .

Определяют $\bar{t}_{p_{eff}}$ из выражения:

$$\bar{t}_{p_{eff}} \approx 0,5(t_{hw} - t_{cw}) + 8 \div 9 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (15)$$

Далее определяют значение q_{us} , а затем – эффективное значение средней рабочей температуры поверхности ЛПТП.

2. С учетом значения $\bar{t}_{p_{eff}}$ (п. 1) и заданных значений t_a , $q_{fall_g}^\Sigma$, β_g , $\rho_{p_{eff}}$ и $\alpha_{out_{s_2-o}}^\Sigma$ из выражения (8) и с учетом (10) определяется значение K_{br-p-a}^{eff} .

3. При подстановке полученных значений $\bar{t}_{p_{eff}}$ (п. 1) и K_{br-p-a}^{eff} (п. 2) в выражение (6), с учетом заданных значений t_a и $q_{abs_p}^\Sigma$, находится мгновенное значение q_{us} .

4. На основе значения q_{us} (п. 3) с учетом заданных значений t_{cw} , t_{hw} и $c_{pw} = 4186,8 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{ }^\circ\text{C)}$ из выражения (1) определяется мгновенное значение \dot{m}_w .

5. При подстановке полученных значений \dot{m}_w (п. 4) и K_{br-p-a}^{eff} (п. 2) в выражение (11), с учетом заданных значений t_{cw} , t_{hw} , t_0 и $q_{abs_p}^\Sigma$, определяется значение η_{hp} .

6. С учетом значения K_{br-p-a}^{eff} , полученного по п. 2, и заданных значений $q_{abs_p}^\Sigma$, t_{cw} , t_{hw} , t_a из выражения (12) определяется значение усредненной по длине ТОК ЛПТП коллектора среднemasсовой температуры нагреваемой в нем воды (\bar{t}_{w_2}).

7. При подстановке полученных по пп. 2, 5 и 6 значений K_{br-p-a}^{eff} , η_{hp} и \bar{t}_{w_2} в выражение (7), с учетом заданных значений $q_{abs_p}^\Sigma$ и t_a , находится значение мгновенной удельной теплопроизводительности данного ПСВК (q_{us}), в котором учтено влияние частичного поглощения и преобразования в тепло проходящего через СП его корпуса суммарного СИ и значение усредненной по длине ТОК ЛПТП среднemasсовой температуры воды (\bar{t}_{w_1}) вместо среднеарифметической ($\bar{t}_{w_{ar}}$).

8. С учетом значения \dot{m}_w , полученного в п. 2, и заданных значений t_{cw} , t_{hw} , t_a , $\alpha_{out_{s_2-o}}^\Sigma$, $q_{fall_g}^\Sigma$, β_g , $\rho_{p_{eff}}$ и $q_{abs_p}^\Sigma$ из выражения (9) определяется значение $\bar{t}_{p_{eff}}$, в котором учтено влияние частичного поглощения и преобразования в тепло проходящего через СП корпуса ПСВК суммарного СИ.

Результатом расчетов является мгновенное значение q_{us} в зависимости от t_{cw} , до которой требуется нагреть воду в ПСВК, при заданных значениях внешних факторов.

Достоверность предложенной модели и результатов расчетов по ее реализации подтверждается с помощью сопоставления значений q_{us} , полученных по выражениям (1), (6) и (7), и $\bar{t}_{p_{eff}}$, которые в свою очередь были определены по выражениям (9) и (15).

Пример практической реализации предложенной тепловой модели ПСВК и анализ полученных результатов

Требовалось найти значение q_{us} ПСВК среднего качества (без селективного лучепоглощающего покрытия на поверхности ЛПТП) с площадью фронтальной поверхности корпуса $F_{fr} = 1,935 \text{ м}^2$, установленного под углом 30° к горизонту при южной ориентации в условиях г. Ташкента, в определенном мо-



мент времени (полдень) по стандартному времени 15 августа (12 ч. 28 мин) при фиксированных значениях $q_{fall_g}^{\Sigma} = 850 \text{ Вт/м}^2$ ($q_{fall_g}^{dir} = 760 \text{ Вт/м}^2$ и $q_{fall_g}^{eff} = 90 \text{ Вт/м}^2$), $t_a = 30^\circ \text{C}$, $\alpha_{out_{g_2-o}}^{\Sigma} = 25,0 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$, $t_{cw} = 20^\circ \text{C}$. Согласно результатам лабораторных измерений и соответствующих расчетов $F_{hep} = 1,8 \text{ м}^2$, $K_{fill} = 0,93$, $\delta_{a.l.p-g_1} = 0,014 \text{ м}$, $\delta_g = 0,004 \text{ м}$, $\beta_g = 35 \text{ м}^{-1}$, $\tau_{dd} = 0,94$, $(\alpha_p \tau_{ic})_{eff}^{dir} = 0,70$ и $(\alpha_p \tau_{ic})_{eff}^{dif} = 0,61$. Значение $q_{abs_p}^{\Sigma}$, найденное в (13), составляет $586,9 \text{ Вт/м}^2$ ($q_{abs_p}^{dir} = 532,0 \text{ Вт/м}^2$ и $q_{abs_p}^{eff} = 54,9 \text{ Вт/м}^2$).

Температура $\bar{t}_{p_{eff}} = 0,5(20+55)+9^\circ \text{C} = 46,5^\circ \text{C}$.

Соответствующее значение K_{br-p-o}^{eff} , определенное по выражению (8) с учетом (10), составляет $6,2531 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$. Мгновенное значение \dot{m}_w по выражению (6), при котором обеспечивается значение $\bar{t}_{w_{out}} = 55^\circ \text{C}$, составляет $11,8837 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{час)}$. Значения η_{hp} и \bar{t}_{w_i} , определенные по выражениям (11) и (12), составляют $0,9084^\circ \text{C}$ и $38,7^\circ \text{C}$ соответственно. Как видно, значение \bar{t}_{w_i} по (12) на $1,2^\circ \text{C}$ (т.е. на $3,2\%$) больше, чем значение $\bar{t}_{w_{ar}}$ по (5).

При этом значение q_{us} по выражению (7) равно $483,72 \text{ Вт/м}^2$. И, наконец, значение $\bar{t}_{p_{eff}}$ по выражению (9) с учетом (10) составляет $46,5^\circ \text{C}$. Результатом расчетов является значение $q_{us} = 483,72 \text{ Вт/м}^2$ при $t_{hw} = 55^\circ \text{C}$. Для того чтобы обеспечить значение $t_{hw} = 55^\circ \text{C}$ при заданных значениях исходных данных, необходимо обеспечить мгновенное значение G_w через данный коллектор, равное $22,9952 \text{ кг/час}$ (т.е. $\dot{m}_w = 3,301 \cdot 10^{-3} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$). Полное совпадение значений $q_{us} = 483,72 \text{ Вт/м}^2$ по выражениям (1), (6) и (7) и $\bar{t}_{p_{eff}} = 46,5^\circ \text{C}$ по выражениям (9) и (15) при $t_{hw} = 55^\circ \text{C}$ подтверждает достоверность предложенной модели и выполненных по ней расчетов.

Аналогичным образом определяются значения q_{us} для других моментов времени светового дня, на основе которых строится график дневного хода удельной теплопроизводительности рассматриваемого ПСВК. На основе интегрирования дневного хода q_{us} (методом планиметрирования) для характерных дней рассматриваемого месяца определяется значение $Q_{us_i}^{day}$, а затем на его основе – $Q_{us_i}^{month}$. И, наконец, из суммарного значения $Q_{us_i}^{month}$ определяются значения Q_{us} : сезонное (например, за теплый период года Q_{us}^{wssy}) или годовое (Q_{us}^{year}) значения удельной теплопроизводительности данного ПСВК в зависи-

мости от заранее заданного значения температуры получаемой из него горячей воды (t_{hw}).

Согласно результатам исследований по практической реализации предложенной тепловой модели ПСВК [14], значения Q_{us}^{year} для рассмотренного коллектора в двухконтурных системах горячего водоснабжения при $t_{hw} = 37^\circ \text{C}$, 45°C и 55°C составляют $3029,3 \text{ МДж/(м}^2 \cdot \text{год)}$, $2767,0 \text{ МДж/(м}^2 \cdot \text{год)}$ и $2437,1 \text{ МДж/(м}^2 \cdot \text{год)}$ соответственно. Для значений t_{hw} , отличающихся от 37°C ; 45°C и 55°C , соответствующие значения Q_{us}^{year} могут быть определены из аппроксимационной зависимости:

$$Q_{us}^{year} = 3029,3 - 32,85(t_{hw} - 37^\circ\text{C}) \text{ МДж/(м}^2 \cdot \text{год)}, \quad (16)$$

дающей максимальную погрешность в расчетах $1,0\%$.

Заключение

В статье была рассмотрена тепловая модель ПСВК, позволяющая определить мгновенные значения удельной теплопроизводительности в зависимости от заранее заданного значения температуры получаемой горячей воды. Предложенная тепловая модель может быть использована для определения технико-экономических и экологических показателей ПСВК в зависимости от режима эксплуатации в СГВС.

При практической реализации предложенной модели впервые использованы полученные авторами расчетные зависимости по определению значений теплотехнических параметров ПСВК, входящих в систему их балансовых уравнений.

Анализ полученных результатов подтверждает достоверность предложенной модели и выполненных по ней расчетов.

Список литературы

1. Avezov, R.R. History and State of Solar Engineering in Uzbekistan / R.R. Avezov, N.R. Avezova et al. // Applied Solar Energy. – 2012. – Vol. 48. – No. 1. – P. 14–19.
2. Вейнберг, В.Б. Оптика в установках для использования солнечной энергии / В.Б. Вейнберг. – М.: Оборонгиз, 1959. – С. 224.
3. Петухов, Б.В. Расчет солнечных водонагревателей. В сб. № 1 «Использование солнечной энергии» / Б.В. Петухов. – М.: Изд. АН СССР, 1957. – С. 177–201.
4. Hottel, H.S. The Performance of Flat-Plate Solar Heat-Collectors / H.S. Hottel, B.B. Woerts // Trans. ASME. – 1942. – Vol. 64. – P. 91–104.
5. Bliss R.W. The Derivation of Several “Plate Efficiency Factor Useful in the Design of Flat-Plate Solar Heat Collectors” / R.W. Bliss // Solar energy. – 1959. – Vol. 3. – No. 4. – P. 55–60.
6. Hottel, H.S. Evolution of the Flat-Plate Collector Performance / H.S. Hottel, A. Whillier // Transaction of



the Conference on the Use of Solar Energy. –University of Arizona Press, 1958. – Vol. 2. – No. – 1. P. 74–78.

7. Даффи, Дж. Основы солнечной теплоэнергетики / Дж. Даффи, У. Бекман. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2013. – С. 888.

8. Фрид, С.Е. Методы тепловых испытаний солнечных коллекторов / С.Е. Фрид // Препринт ИВТАН, 1988. – № 3(248). – С. 57.

9. Avezova, N.R. No-contact Method of Determining Average Working-Surface Temperature of Flat-Type Radiation Absorbing Thermal Exchange Panels of Flat Solar Collectors for Heating Heat Carrying Liquid / N.R. Avezova, R.R. Avezov // Applied Solar Energy. – 2015. – Vol. 51. – No. 2. – P. 85–87.

10. Аvezова, Н.Р. Влияние частичного поглощения солнечного излучения в светопрозрачных покрытиях корпуса плоских солнечных коллекторов на тепловые потери их лучепоглощающих теплообменных панелей в окружающую среду / Н.Р. Аvezова [и др.] // Гелиотехника. – 2016. – № 3. – С. 16–21.

11. Аvezова, Н.Р. Влияние частичного поглощения солнечного излучения в светопрозрачных покрытиях корпуса плоских солнечных коллекторов для нагрева жидкого теплоносителя на температуру их лучепоглощающих теплообменных панелей / Н.Р. Аvezова [и др.] // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. Ташкент: Изд. Ташкентского Государственного Технического Университета. – 2016. – № 1–2. – С. 186–190.

12. Avezova, N.R. Procedure for Determining the Average Heat Transfer Temperature in Heat Removal Channels of Flat Solar Collectors and Other Thermal Engineering Parameters and Complexes According to Thermal Testing Results / N.R. Avezova // Applied Solar Energy. – 2015. – Vol. 51. – No. 3. – P. 172–176.

13. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № DGU03822. Математическая модель для определения теплопроизводительности плоских солнечных водонагревательных коллекторов при наперед заданной температуре, получаемой из них горячей воды // Аvezов Р.Р., Аvezова Н.Р. // Агентство по интеллектуальной собственности РУз, 27.05.2016.

14. Avezova, N.R. Resource Indexes of Flat Solar Water-heating Collectors in Hot-Water Supply systems: 4: Specific Collector Thermal Yield and Efficiency / N.R. Avezova [et al.] // Applied Solar Energy. – 2013. Vol. 49. – No. 4. – P. 202–210.

References

1. Avezov R.R., Avezova N.R. et al. History and State of Solar Engineering in Uzbekistan. Applied Solar Energy. 2012;(48/1):14–19 (in Eng.).

2. Veinberg V.B. Optika v ustanovkah dlâ ispol'zovaniâ solnečnoj ènergii. Moscow: Oborongiz Publ., 1959, p. 224 (in Russ.).

3. Petuhov B.V. Rasçet solneçnyh vodonagrevatelej. B. no. 1: “Ispol'zovanie solnečnoj

ènergii”. Moscow: Izd. AN USSR Publ., 1957, pp. 177–201 (in Russ.).

4. Hottel H.S., Woerts B.B. The Performance of Flat-Plate Solar Heat-Collectors. Trans. ASME, 1942, vol. 64, pp. 91–104 (in Eng.).

5. Bliss R.W. The Derivation of Several “Plate Efficiency Factor Useful in the Design of Flat-Plate Solar Heat Collectors”. Solar energy. 1959;(3/4):55–60 (in Eng.).

6. Hottel H.S., Whillier A. Evolution of the Flat-Plate Collector Performance. Transaction of the Conference on the Use of Solar Energy, University of Arizona Press. 1958;(2/1):74–78 (in Eng.).

7. Daffi J., Bekman U. Osnovy solnečnoj teploènergetiki. Dolgoprudny: Izdatel'skij dom “Intellekt” Publ., 2013, pp. 888 (in Russ.).

8. Frid S.E. Metody teplovyh ispytaniy solneçnyh kollektorov. Preprint IVTAN. 1988;(3/248):57 (in Russ.).

9. Avezova N.R., Avezov R.R. No-contact Method of Determining Average Working-Surface Temperature of Flat-Type Radiation Absorbing Thermal Exchange Panels of Flat Solar Collectors for Heating Heat Carrying Liquid. Applied Solar Energy. 2015;(51/ 2): 85–87 (in Eng.).

10. Avezova N.R., Vohidov A.U., Abduhamidov D.U., Rahimov È.Yu. Vliânie çastiçnogo pogloùeniâ solneçnogo izluçeniâ v svetoprozraçnyh pokrytiâh korpusa ploskikh solneçnyh kollektorov na teplovye poteri ih luçepogloùâùshih teploobmennyyh panelej v okružaùùu sreedu. Geliotekhnika. 2016;(3):16–21 (in Russ.).

11. Avezova N.R., Avezov R.R., Usmanov A.Yu., Vohidov A.U., Rahimov È.Yu. Vliânie çastiçnogo pogloùeniâ solneçnogo izluçeniâ v svetoprozraçnyh pokrytiâh korpusa ploskikh solneçnyh kollektorov dlâ nagreva židkogo teplonositelâ na temperaturu ih luçepogloùâùshih teploobmennyyh panelej. Problemy ènergo- i resursosbereženiâ. 2016;(1–2):186–190 (in Russ.).

12. Avezova N.R. Procedure for Determining the Average Heat Transfer Temperature in Heat Removal Channels of Flat Solar Collectors and Other Thermal Engineering Parameters and Complexes According to Thermal Test-ing Results. Applied Solar Energy. 2015;(51/3):172–176 (in Eng.).

13. Avezov R.R., Avezova N.R. Svidetel'stvo ob oficial'noj registracii programmy dlâ ÈVM # DGU03822. Matematičeskââ model' dlâ opredeleniâ teploproduktivnosti ploskikh solneçnyh vodonagrevatel'nyh kollektorov pri nâpered zadannoj temperature, poluçaemoj iz nih gorâçej vody // Agentstvo po intellektual'noj sobstvennosti RUz, 27.05.2016 (in Russ.).

14. Avezova N.R., Avezov R.R., Rustamov N.T. et al. Resource Indexes of Flat Solar Water-heating Collectors in Hot-Water Supply systems: 4: Specific Collector Thermal Yield and Efficiency. Applied Solar Energy. 2013;(49/4): 202–210 (in Eng.).

Транслитерация по ISO 9:1995

