

19. Rutovitz J., Atherton A. Energy sector jobs to 2030: a global analysis. Institute for Sustainable Futures, <http://www.isf.uts.edu.au/publications/workingfortheclimate2009.pdf>

20. Morris G. The Value of the Benefits of U.S. Biomass Power. Subcontractor Report. NREL/SR-570-27541, 1999.

Получено 13.12.2011 р.

УДК 697.7

Дубровская В.В.¹, Шкляр В.И.¹, Негодуйко И.А.²

¹ Национальный технический университет Украины «КПИ»

² «Энергосбыт Киевэнерго»

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ВАКУУМНОГО СОЛНЕЧНОГО КОЛЛЕКТОРА

Проведено енергетичний та ексергетичний аналіз сонячної водонагрівальної установки з вакуумним колектором. Визначена ексергетична ефективність елементів і установки в цілому.

Проведен енергетический и эксергетический анализ солнечной водонагревательной установки с вакуумным коллектором. Определены эксергетическая эффективность элементов и установки в целом.

The energy and exergy analysis of solar heat water systems with vacuum collectors were performed. The exergy losses in elements and all equipment were calculated.

A – площа солнечного коллектора;
 C_1 – коэффициент полных тепловых потерь;
 C_2 – коэффициент тепловых потерь;
 Ex – эксергия;
 h – энтальпия;
 I – плотность солнечного излучения;
 m – массовый расход воды;
 s – энтропия;
 T – температура;
 W – электрическая мощность;
 ΔT – разность температур;
 Ψ – удельная эксергия;
 ϵ_K – эксергетическая эффективность;
 η – КПД солнечного коллектора;

η_0 – оптический КПД солнечного коллектора.

Индексы нижние:

sr – солнечная радиация;
 vx – вход;
 vyx – выход;
 n – насос;
 oc – окружающая среда;
 $пог$ – поглощенная;
 $пол$ – полезная;
 $пот$ – потери;
 $ск$ – солнечный коллектор;
 $ср$ – среднее;
 t – теплоноситель;
 $то$ – теплообменник.

Современное развитие мировой экономики неотрывно связано с возрастанием темпов производства энергии. Сегодня в Украине одним из приоритетных направлений энергосектора является возобновляемая энергетика и энергосбережение. С каждым годом в стране появляется все больше новых предприятий, вырабатывающих оборудование для возобновляемых

источников энергии: солнечной, геотермальной, ветровой, биомассы, но не находят спроса в Украине.

Украина имеет достаточный солнечный потенциал. По результатам анализа статистических и метеорологических данных установлено, что внедрение солнечных систем целесообразно на всей территории Украины.

Солнечный коллектор – наиболее известное устройство, которое непосредственно преобразует энергию Солнца. В системах теплоснабжения используются два типа солнечных коллекторов: плоский и вакуумный.

Для исследования эффективности разных конструкций солнечных коллекторов и определения их теплотехнических характеристик в НТУУ «КПИ» был создан экспериментальный стенд солнечной водонагревательной установки, оснащенный современной измерительной аппаратурой и солнечным коллектором «АТТ-b15», установленным на фасаде корпуса № 5 [1].

С помощью этой установки с февраля 2008 года проводились исследования украинского вакуумного солнечного коллектора «АТТ-b15» предприятия «АТТ-Solar». Результаты этих исследований приведены в работе [2].

На основе полученных экспериментальных данных, был рассчитан коэффициент полезного действия вакуумного солнечного коллектора (рис. 1) по формуле [3]:

$$\eta = \eta_0 - C_1 \cdot \frac{T_{\text{CP}} - T_{\text{OC}}}{I} - C_2 \cdot I \cdot \left(\frac{T_{\text{CP}} - T_{\text{OC}}}{I} \right)^2, \quad (1)$$

где $\eta_0 = 0,75$; $C_1 = 1,529 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$; $C_2 = 0,0166 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$; T_{CP} – средняя температура теплоносителя на входе и выходе из абсорбера.

На рис. 1 приведены зависимости эффективности плоских и вакуумных солнечных коллекторов от параметра $\chi = (T_{\text{CP}} - T_{\text{OC}})/I$. Эффективность вакуумного солнечного коллектора с тепловыми трубами – наивысшая. При малых значениях параметра χ КПД вакуумного солнечного коллектора почти совпадает с плоским. Однако, при значении параметра $\chi = 0,12$ КПД вакуумного СК равняется 36 %, а плоского – 11 %.

На рис. 2 изображена зависимость КПД солнечных коллекторов: плоского, вакуумного и вакуумного с тепловыми трубами «АТТ-b15» от ΔT .

При разнице температур нагретой воды и окружающего воздуха $\Delta T < 20 \text{ °C}$, КПД ва-

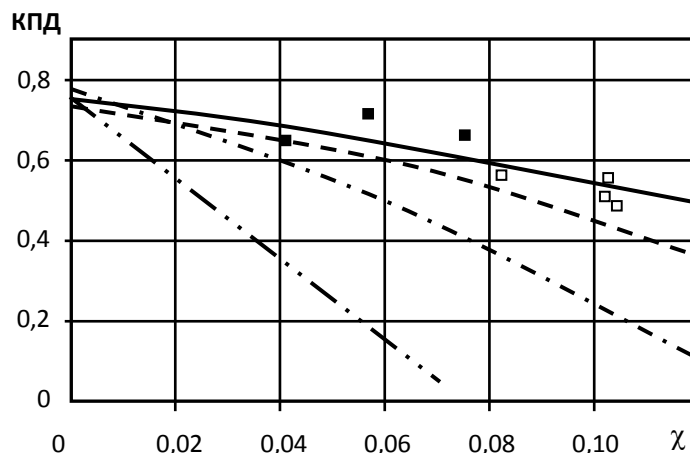


Рис. 1. Сравнение КПД солнечных коллекторов:
плоские СК: --- [6]; - - - - [5];
вакуумные СК с тепловыми трубами:
 - - - - [6]; — – АТТ-b15;
 \square – зимний солнечный день АТТ-b15;
 \blacksquare – летний солнечный день АТТ-b15.

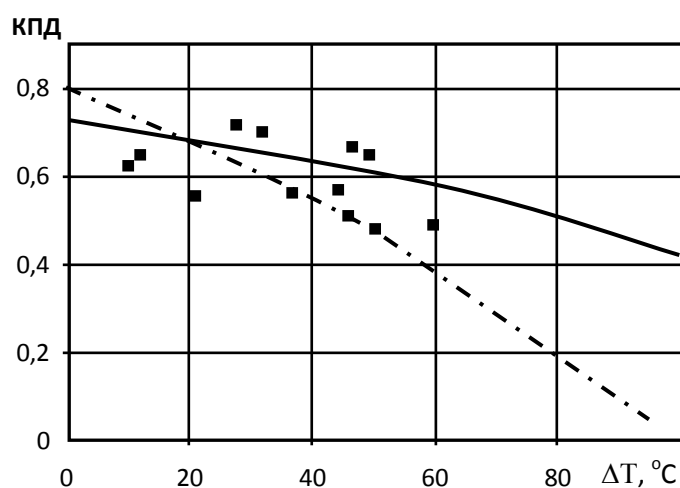


Рис. 2. Зависимость КПД солнечных коллекторов от разницы температур нагретой воды и окружающего воздуха:
 - - - – плоский СК [7]; \blacksquare – СК АТТ-b15;
 — – вакуумный СК [7].

куумного солнечного коллектора ниже КПД плоского СК, но при $\Delta T > 20 \text{ °C}$, КПД вакуумного солнечного коллектора выше КПД плоского СК. Так, при $\Delta T = 90 \text{ °C}$ КПД вакуумного СК равняется 47 %, а плоского – 10 %.

Преобразование энергии солнечного излучения в теплоту в солнечных установках

является необратимым термодинамическим процессом, который характеризуется возрастанием энтропии системы и потерями эксергии.

Для анализа эффективности работы солнечных коллекторов используется понятие эксергетической эффективности, которая характеризует степень необратимости оптических и тепловых процессов, протекающих в аппарате (прохождение солнечных лучей через коллектор, поглощение их поверхностью коллектора, передача поглощенной энергии теплоносителю, тепловые потери в окружающую среду и т.п.).

Эксергетическая эффективность системы в целом равняется:

$$\varepsilon = Ex_{\text{ВЫХ}}/Ex_{\text{ВХ}} = 1 - Ex_{\text{ПОГ}}/Ex_{\text{ВХ}} \quad (2)$$

Эксергетическая эффективность $\varepsilon_{\text{СК}}$ солнечного коллектора определяют из уравнения [4-5]:

$$\varepsilon_{\text{СК}} = Ex_{\text{ПОЛ}}/Ex_{\text{ПОГ}}, \quad (3)$$

где $Ex_{\text{ПОЛ}}$ – полезная эксергия, кВт, $Ex_{\text{ПОГ}}$ – эксергия, поглощенная солнечным коллектором;

$$Ex_{\text{ПОЛ}} = m[(h_{\text{ВЫХ}} - h_{\text{ВХ}}) - T_0(s_{\text{ВЫХ}} - s_{\text{ВХ}})], \quad (4)$$

$$Ex_{\text{ПОГ}} = A \cdot I_T [1 + 1/3(T_{\text{ОС}}/T_{\text{SR}})^4 - 4/3(T_{\text{ОС}}/T_{\text{SR}})^2], \quad (5)$$

где $T_{\text{SR}} = 6000 \text{ К}$.

Расчеты по формуле (3) дают возможность установить как качественную, так и количественную зависимость эксергетической эффективности солнечного коллектора от плотности солнечной радиации, температуры окружающей среды и характеристик солнечного коллектора.

Эксергетическая эффективность теплообменника:

$$\varepsilon_{\text{ТО}} = 1 - \frac{2T_{\text{ОС}} (\Delta T_T / T_{\text{ВХ}}^2)}{(T_{\text{ВХ}} - T_{\text{ОС}}) / T_{\text{ВХ}} + T_{\text{ОС}} (\Delta T_T / T_{\text{ВХ}}^2)}, \quad (6)$$

где для теплоносителя $\Delta T_T < T_{\text{ВХ}}$ и $\Delta T_T = T_{\text{ВХ}} - T_{\text{ВЫХ}}$.

Эксергетическая эффективность циркуля-

ционного насоса:

$$\varepsilon_{\text{Н}} = \frac{Ex_{\text{НВЫХ}} - Ex_{\text{НВХ}}}{W_{\text{Н}}} = \frac{m(\psi_{\text{НВЫХ}} - \psi_{\text{НВХ}})}{W_{\text{Н}}}, \quad (7)$$

Для определения эффективности работы солнечной установки на базе вакуумного коллектора с тепловыми трубками был проведен эксергетический анализ каждого элемента и всей установки в целом, включая солнечный коллектор, насос и теплообменник бака-аккумулятора. Для этого использовалась упрощенная схема установки (рис. 3).

В таблицах 1 и 2 приведены результаты расчета эксергетической эффективности элементов солнечной установки и системы в целом для летнего дня.

На рис. 4 изображена зависимость эксергетической эффективности плоского солнечного коллектора [5] и вакуумного солнечного коллектора с тепловыми трубками «АТТ-b15» от параметра χ .

Эксергетический анализ позволил оценить эффективность каждого элемента системы и систему в целом, а также поможет в проектировании более эффективных систем.

Выводы

1. КПД вакуумного солнечного коллектора с тепловыми трубками «АТТ-b15» находится в диапазоне от 60 до 75 % в летний солнечный

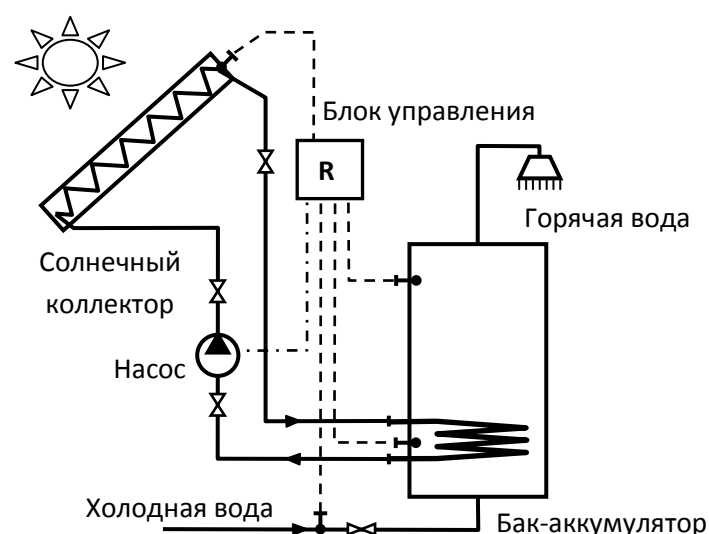


Рис. 3. Упрощенная схема установки.

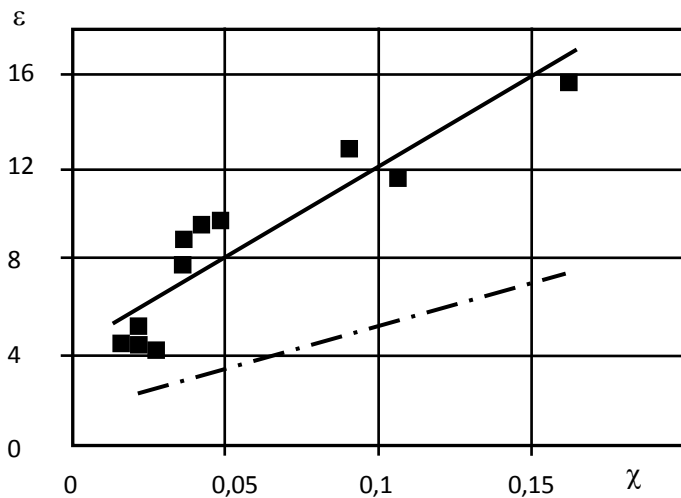


Рис. 4. Сравнение эксергетической эффективности солнечных коллекторов:

--- - плоский СК [5];
 ■ - СК АТТ-b15.

день и 45...60 % в зимний солнечный день.

2. Эксергетический анализ позволил оценить эффективность работы каждого элемента отдельно и установки в целом. Значения эксергетической эффективности вакуумного солнечного коллектора составляет 9,1 %, циркуляционного насоса – 2,8 %, теплообменника – 55,2 % и системы в целом – 29,6 %.

3. Значения эксергетической эффективности плоского солнечного коллектора при значении параметра $\chi = 0,02$ составляет 2,2 %, а вакуумного – 5,2 %; при значении параметра $\chi = 0,16$ составляет 7,4 % и 17 % соответственно.

4. Эксергетический анализ дает возможность определить потери эксергии в элементах установки, которые можно уменьшить путем усовершенствования процесса или конструкции установки.

Табл. 1. Исходные данные для расчета эксергетической эффективности

Название элемента	Температура $T, ^\circ\text{C}$	Удельная энтальпия $h, \text{кДж/кг}$	Удельная энтропия $s, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	Удельная эксергия $\psi, \text{кДж/кг}$	Эксергия $E_x, \text{кВт}$	Энергия $E, \text{кВт}$
-	16,3	68,4	0,243	-	-	-
СК (вход)	38,1	159,5	0,547	3,31	0,0928	4,47
СК (выход)/теплообменник (вход)	56,3	235,6	0,784	10,69	0,299	6,60
теплообменник (выход)/насос (вход)	38,05	159,1	0,545	3,28	0,092	4,46
насос (выход)/СК (вход)	38,1	159,5	0,547	3,31	0,0928	4,47
холодная вода	20	83,3	0,294	0,204	0,001	0,42
горячая вода	60	250,5	0,829	12,63	0,063	1,25

Табл. 2. Эксергетическая эффективность солнечной установки

Название элемента	Эксергетическая эффективность $\epsilon, \%$
Солнечный коллектор	9,1
Циркуляционный насос	2,8
Теплообменник	55,2
Система в целом	29,6

ЛИТЕРАТУРА

1. *Матвійко І.А., Дубровская В.В., Шкляр В.И. и др.* Исследование работы вакуумного солнечного коллектора «АТТ-b15» // Матер. 10-ї ювілейної міжнар. Науково-практ. конф. [Відновлювана енергетика ХХІ століття], (АР Крим, смт. Миколаївка, 14-18 вересня 2009 р.) – Крим, 2009. – С. 179–182.
2. *Дубровська В.В., Шкляр В.І., Матвійко І.О.* Визначення частки заміщення традиційної енергії в системі гарячого водопостачання з сонячним колектором // Відновлювана енергетика – 2010. – № 4. – С. 33–39.
3. *Амерханов Р.А., Бутузов В.А., Гарькавий К.А.* Вопросы теории и инновационных решений при использовании гелиоэнергетических систем. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 504 с.
4. *Авезов Р.Р.* Эксергетическая эффективность плоских солнечных тепловых коллекторов // Гелиотехника. – 1999. – № 5. – С. 66–72.
5. *Huseyin Gunerhan, Arif Hepbasli.* Exergetic modeling and performance evaluation of solar water heating systems for building applications // Energy and Buildings. – 2007. – № 39. – P. 509–516.
6. *Рассамакин Б.М., Хайрнасоев С.М., Матвійко І.А. и др.* Стенд для испытаний солнечных коллекторов // Зб. наукових статей за матеріалами V Міжнар. науково-практ. конф. [«Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні»], – Львів: 2009. – С. 234–238.
7. *Гершкович В.Ф.* Солнечные установки горячего водоснабжения: пособие по проектированию. – К.: ЗНИИЭП, 2006. – 26 с.
8. *Солнечные системы теплоснабжения* [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.avante.com.ua/rus/library/lib_solnechnie_sistemi_otoplenia.html.

Получено 18.10.2011 г.