

DETERMINATION OF POWER CHARACTERISTICS OF LOW-TEMPERATURE STIRLING ENGINE

I. Beletskiy, V. Safonov

The power calculation of low-temperature Stirling engine model was resulted. The parameters influenced on its operation were determined. The simple and practical method of power and engine efficiency calculation was suggested.

Список используемых источников

1. Уокер Г. Машины, работающие по циклу Стирлинга / Г. Уокер. – М.: Наука, 1978. – 152 с.
2. Ридер Г. Двигатели Стирлинга / Г. Ридер, Ч. Хупер. – М.: Мир, 1986. – 464 с.
3. Сычев В.В. Термодинамические свойства воздуха / В.В. Сычев, А.А. Вассерман // ГСССД. Серия Монографии. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 276 с.
4. Кухлинг Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг. - М.: Мир, 1985. – 520 с.

Надійшла до редакції 04.06.2013 р.

УДК 621.311.243:620.9(07)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ТЕРМОСИФОННОЙ УСТАНОВКИ СОЛНЕЧНОГО ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

В.А. Якимов¹, В.В. Кувшинов², М.Б. Кузьмин², С.Г. Осетров¹

²Академия военно-морских сил им. П.С. Нахимова, г. Севастополь

¹Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

Приведены результаты первого опыта физического моделирования установки солнечного горячего водоснабжения (УСГВ) с термосифонным плоским коллектором. Определены возможности оценки параметров полномасштабной УСГВ с естественной циркуляцией (ЕЦ) теплоносителя по результатам модельных опытов. Модель УСГВ разработана и создана на кафедре «Энергосбережения и нетрадиционных источников энергии».

Введение

В Украине накоплен большой опыт исследования, проектирования и эксплуатации бытовых и промышленных систем горячего водоснабжения, отопления и кондиционирования на основе солнечной энергии.

Наиболее широкое распространение получили системы горячего водоснабжения объектов сезонного функционирования (пансионаты, базы отдыха и туризма, детские лагеря, оборудованные пляжи), а также индивидуальных жилых домов и строений дачного типа. Для этих целей необходимо разрабатывать и проектировать простые в эксплуатации установки, не требующие дополнительного энергетического обеспечения и имеющие невысокую цену.

Из всех возможных вариантов современных УСГВ наиболее простыми в эксплуатации являются одноконтурные установки (вода, нагретая в солнечном коллекторе, поступает непосредственно к потребителю через бак-аккумулятор) с естественной циркуляцией теплоносителя (термосифонные системы), без дублирующего источника энергии. Использование простых змеевиковых трубчатых систем в коллекторах существенно упрощает технологию их изготовления и повышает динамические качества системы (более быстрый нагрев воды на стадии разогрева). Термосифонная система является саморегулируемой, то есть расход горячей воды (производительность УСГВ) прямо пропорциональна интенсивности солнечного излучения. Сложность формализации взаимосвязей параметров внутри УСГВ с естественной циркуляцией приводит к усложнению расчетных методик и к необходимости их корректировки и проверки натурными и модельными исследованиями. Оптимальное сочетание теоретических и экспериментальных методов исследования определяет направление конструкторских и технологических новаций.

Постановка цели и задач научного исследования

Цель исследования заключается в оценке возможностей моделирования основных параметров натурной термосифонной УСГВ на физических моделях, выполненных в геометрическом масштабе по отношению к натуре. В общей постановке теории подобия для гелиотехнической системы, в которой происходят преобразования видов энергии, взаимодействие теплофизических и гидравлических процессов, задача формулируется достаточно сложно, еще сложнее ее решение. Как правило, расчеты таких систем носят поверочный характер.

Принят следующий метод решения поставленной задачи:

- разработана и реализована малогабаритная модель УСГВ с естественной циркуляцией теплоносителя, с плоским солнечным коллектором и змеевиковой трубной системой;
- материалы элементов УСГВ в основном соответствуют натурным;
- испытания модели проведены в реальных условиях, тепловые поля модели и натурны адекватны, то есть у модели и натурны одинаковы: интенсивность солнечного излучения, температуры входа и выхода воды в коллекторе, температура абсорбера (пластины);
- проведены опыты на модельной установке на протяжении светового дня, получены зависимости температурного поля и производительности от времени суток, оценена интенсивность солнечного излучения, определен коэффициент тепловых потерь U_L ;
- полученные экспериментальные данные использованы для определения основных параметров полномасштабной УСГВ, отнесенные к 1 м^2 поверхности абсорбера моделируемой установки;
- анализ результатов, сравнения расчетных и опытных данных дают возможность предварительной оценки принятого способа определения параметров натурной установки, конструктивно подобной модельной УСГВ.

Описание экспериментальной установки

Принципиальная схема УСГВ с естественной циркуляцией теплоносителя представлена на рис. 1.

В состав модельной установки входят плоский прямоточный коллектор змеевикового типа 1, бак-аккумулятор 2, трубопроводы с арматурой и расходный трубопровод 3,

клапан 4, исключающий возможность обратной циркуляции теплоносителя. Измерительная система включает термоэлектрические датчики температуры воды на входе в коллектор, на выходе из коллектора, температуры в средней части абсорбера (пластины), температуры окружающей среды.

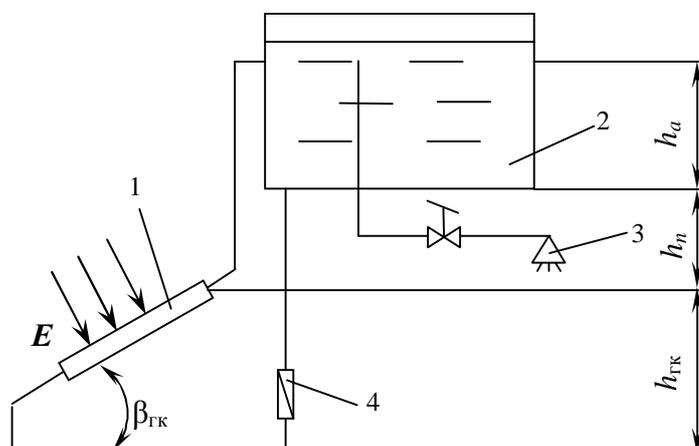


Рис. 1. Установка солнечного горячего водоснабжения на естественной циркуляции теплоносителя (одноконтурная):
1 – гелиоколлектор; 2 – бак-аккумулятор; 3 – расходный трубопровод с потребителем; 4 – обратный клапан

Плоский солнечный коллектор (ПСК) (рис. 2) имеет шесть горизонтальных трубок внутренним диаметром 6 мм, соединенных последовательно (змеевиковый тип).

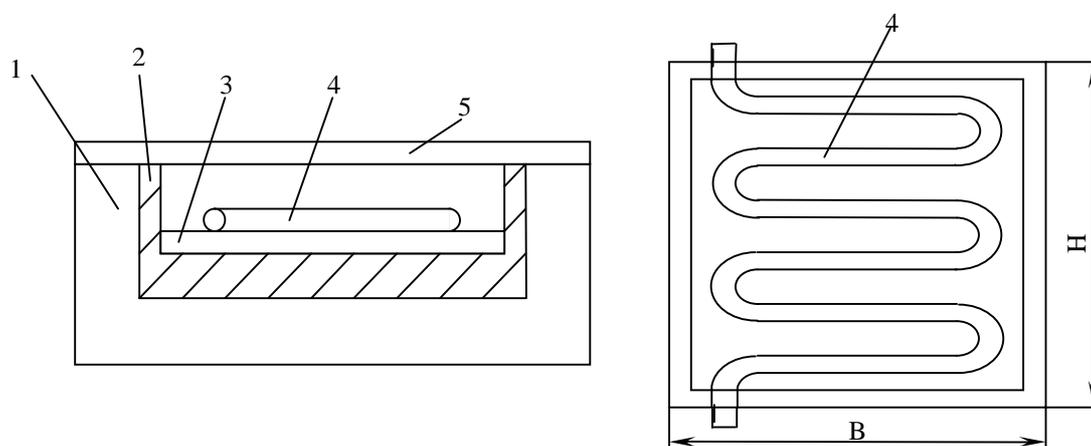


Рис. 2. Плоский солнечный коллектор (змеевиковый тип): 1 – корпус; 2 – изоляция; 3 – абсорбер; 4 – трубная система; 5 – прозрачное покрытие

Трубная система 4 припаяна к абсорберу 3, материал труб и абсорбера – углеродистая сталь, абсорбер и трубная системы изолированы пенопластом 2 толщиной 0,01 м. Прозрачное покрытие 5 выполнено из оптически чистого оргстекла толщиной 0,002 м, корпус коллектора 1 деревянный, габаритные размеры рабочей поверхности коллектора 0,45 х 0,32 м. Высота боковой поверхности 0,045 м. Рабочая площадь коллектора по абсорберу 0,144 м², коллектор ориентирован на юг под углом наклона к горизонту 45°.



Модель бака-аккумулятора – пластмассовый теплоизолированный куб объемом $0,002 \text{ м}^3$, расположенный выше верхней панели. Все элементы установки вмонтированы в модель «Солнечного дома», которая разработана и создана на кафедре «Энергосбережения и нетрадиционных источников энергии» СНУЯЭиП (рис. 3).

Рис. 3. Модель «Солнечного дома»

Результаты экспериментальных исследований

Режим движения жидкости в трубной системе ПСК

Характер движения однофазной жидкости (теплоносителя) в трубной системе ПСК определяем по критерию Рейнольдса [1]. Общая длина последовательно соединенных трубок с учетом межтрубных соединений $L = 2,2 \text{ м}$. Скорости теплоносителя в змеевике определялись по расходу теплоносителя G , кг/с, через поперечное сечение трубной системы $S = \frac{\pi d^2}{4}$:

$$V = \frac{G}{S} = \frac{4G}{\pi d^2} \text{ м/с.} \quad (1)$$

Максимальная производительность по горячей воде (ГВ) установилась с 12 до 14 ч и составляет $g_{\text{тн}} = 0,54 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$, при этом наибольшая скорость теплоносителя в трубной системе коллектора $V_{\text{max}} = 0,152 \text{ м/с}$.

Критерий Рейнольдса для круглых труб

$$R_e = \frac{Vd}{u}, \quad (2)$$

где u – вязкость теплоносителя (воды) при температуре $50 \text{ }^\circ\text{C}$: $u = 0,56 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ [1].

При принятых условиях критерий Рейнольдса $R_e = 1620$. Критическое значение R_e для круглых труб $R_{e \text{ кр.}} = 2000 \dots 2400$, как и следовало ожидать, режим течения в трубной системе змеевикового ПСК – ламинарный.

Методика экспериментальных исследований на модели УСГВ

1. Исследования проводились в мае 2010 года, интенсивность солнечного излучения на наклонную поверхность для реальных условий эксперимента

$$I = I_s R_s + I_d \text{ (Вт/м}^2\text{)}, \quad (3)$$

где I_s , I_d – прямое и рассеянное излучение Солнца в мае месяце для широты $\varphi = 46^\circ$, угол наклона ПСК к горизонту 45° . Значение углового коэффициента R_s , прямого и рассеянного излучений I_s , I_d приняты по справочнику [2] и представлены в табл. 1.

2. Для измерения расхода теплоносителя (производительности по горячей воде) перед входом в бак-аккумулятор установлен клапан, с помощью которого теплоноситель отводится в мерную емкость объемом 50 мл ($G = 50 \text{ г}$). Температурные поля измерены градуированными термометрами. Результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 1

**Интенсивность солнечного излучения на наклонную поверхность ПСК
(справочные данные)**

№ п\п	Параметры излучения	Время суток					
		9.00 - 10.00	10.00 - 11.00	11.00 - 12.00	12.00 - 13.00	13.00 - 14.00	14.00 - 15.00
1	Прямое излучение I_s , Вт/м ²	334,3	335,3	445,6	4445,6	335,3	334,3
2	Рассеянное излучение I_d , Вт/м ²	201,6	256,2	267,5	267,5	256,2	201,6
3	Угловой коэффициент R_s	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12
4	$I = I_s R_s + I_d$ (Вт/м ²)	596,2	651,8	766,5	766,5	651,8	596,2

Т а б л и ц а 2

Сводная таблица экспериментальных данных в рабочем режиме

Параметры	Время измерений					
	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00
$t_{вх.}$	17	24	35	48	58	63
$t_{вых.}$	27	43	55	66	69	71
$t_{п}$, °С (абсорбер)	38	53	59	67	70	72
t_a (окр. среды)	18	19	20	21	22	21
$Dt_f = t_{вых.} - t_{вх.}$	19	19	20	18	11	8
расход ГВ $g_{гн}$, кг/с	$0,33 \cdot 10^{-3}$	$0,44 \cdot 10^{-3}$	$0,54 \cdot 10^{-3}$	$0,46 \cdot 10^{-3}$	$0,39 \cdot 10^{-3}$	$0,3 \cdot 10^{-3}$

3. На основе экспериментальных данных для каждого измерения определялась полезная тепловая мощность модельной установки и её коэффициент полезного действия (мгновенное значение):

$$Q_{пол.} = g_{гн} C_p (t_{вых.} - t_{вх.}) \text{ (Вт)}$$

$$h = \frac{Q_{пол.}}{AI} \cdot 100(\%) \quad , \quad (4)$$

где $g_{гн}$ – расход теплоносителя (производительности по горячей воде), кг/с (см. табл. 2);
 C_p – теплоемкость воды, $C_p = 4190$ Дж/(кг К);
 $t_{вх.}$, $t_{вых.}$ – температуры теплоносителя на входе и выходе из коллектора (°С);
 $Q_{пол.}$ – полезная мощность модельной УСГВ, Вт;
 I – интенсивность солнечного излучения на единицу поверхности наклонного коллектора, Вт/м² (см. табл. 1);
 A – площадь абсорбера модельной УСГВ, м², $A = B \cdot H$.
 Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Полезная мощность и КПД модельной УСГВ

Параметры	Время измерений					
	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00
Полезная мощность $Q_{\text{пол}}, \text{Вт}$	13,8	35,08	45,25	34,7	18,0	10,8
КПД $h, \%$	16,1	37,6	41,3	31,8	19,3	12,6

Использование практических результатов

Оценка параметров натурной УСГВ

На этом этапе можно оценить некоторые показатели моделируемой, геометрически подобной УСГВ.

1. Реальные условия инсоляции модели и натурной определяют основные температурные данные, необходимые для расчета УСГВ: $t_{\text{вх.}}$, $t_{\text{вых.}}$, $t_{\text{п}}$ (температуру абсорбера), t_a (окружающей среды).

2. Производительность модельной установки за 6 часов работы (с 9.00 до 15.00) (см. табл. 2):

$$g_{\text{сут.}} = \sum_{i=1}^{i=6} g_i \cdot 3600 = 2.46 \cdot 10^{-3} \cdot 3600 = 8.85 (\text{кг/сут}).$$

Площадь абсорбера модельной установки $A_{\text{м}} = 0,144 \text{ м}^2$, тогда производительность установки с одного квадратного метра поверхности абсорбера (за 6 ч работы)

$$G = \frac{g_{\text{сут.}}}{A_{\text{м}}} = \frac{8,85}{0,144} = 61,5 (\text{кг/м}^2 \cdot \text{сут}).$$

3. При соблюдении условий геометрического подобия элементов гелиоколлекторов модели и натурной УСГВ удельная (отнесенная к 1 м^2) производительность натурной УСГВ будет практически совпадать с полученным выше результатом на модели, то есть расход горячей воды УСГВ будет в пределах $60 \dots 70 \text{ кг/м}^2 \text{ сут}$ (за 6 ч работы).

4. По мере разогрева установки температура горячей воды в баке-аккумуляторе достигает $t = 60 \dots 70^\circ$, разность температур $Dt_f = t_{\text{вых.}} - t_{\text{вх.}}$ составляет $18 \dots 20^\circ \text{C}$ (за один проход по змеевикому коллектору) (см. табл. 2). Эти параметры существенно выше, чем у коллекторов с параллельной системой нагревательных труб.

5. Для определения полезной мощности и КПД проектируемой установки необходимо иметь данные по температурным параметрам установки и по эффективности коллектора, которая определяется значением равновесной температуры t_m и коэффициентом тепловых потерь коллектора U_L ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$). Расчет этих величин для УСГВ с ЕЦ крайне сложен, мы принимаем метод опытного определения этих величин.

Определение полного коэффициента тепловых потерь коллектора (U_L).

Полный коэффициент тепловых потерь коллектора U_L является важнейшей характеристикой эффективности УСГВ и учитывает все тепловые потери ПСК за счет теплоотдачи, конвекции, излучения. В стационарных или близких к ним режимах является величиной постоянной. В нашей работе использована методика экспериментального

определения U_L [3], основная на данных режимов нулевой полезной мощности и КПД, то есть при полном прекращении циркуляции теплоносителя. В этом случае формула для КПД имеет вид [3]

$$h = \frac{Q_{\text{пол.}}}{AI} = (ta) - \frac{U_L(t_m - t_a)}{I} = 0, \quad (5)$$

где t_m – равновесная температура абсорбера (пластины), определяется из эксперимента;
 (ta) – оптическая характеристика коллектора, учитывает поглощательные свойства системы «абсорбер – оптическое покрытие».

Для одностекольных плоских коллекторов в среднем $(ta) = 0,75$. Из формулы для КПД в режиме нулевой циркуляции расчетная формула для U_L имеет вид

$$U_L = \frac{I(ta)}{(t_m - t_a)}. \quad (6)$$

В табл. 4 приведены данные экспериментальных режимов при нулевой циркуляции теплоносителя и соответствующие значения коэффициентов тепловых потерь U_L и максимальной равновесной температуры абсорбера t_m [4].

Таблица 4

Экспериментальные данные режима нулевой циркуляции

№ п/п	Параметры	Время суток					
		10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00
1	$t_m, ^\circ\text{C}$	35	78	92	105	109	102
2	$t_a, ^\circ\text{C}$	20	21	22	23	23	22
3	$I = I_s R_s + I_d \text{ (Вт/м}^2\text{)}$	596	651,8	766,5	766,5	651,8	596,2
4	(ta)	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
5	$U_L, \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ (разогрев)	29,3	8,57	8,21	7,01	6,68	5,58

Среднее значение коэффициента тепловых потерь за время работы установки с 11.00 до 15.00 (при относительно равномерном нагреве абсорбера) составляет $U_L = 7,21$ Вт/(м²·К). Определенные экспериментально значения U_L находятся в пределах среднестатистических значений коэффициента тепловых потерь для одностекольных плоских солнечных коллекторов $U_L = 6,0 \dots 8,0$ Вт/(м² К) [4].

Из уравнения теплового баланса УСГВ [3] можно определить полезную энергию:

$$Q_{\text{пол.}} = AF_R [I(ta) - U_L(t_{\text{вх.}} - t_a)]. \quad (7)$$

Коэффициент отвода теплоты от коллектора F_R вводится в случае, когда температура пластины (абсорбера) заменяется температурой входа, то есть условно считаем, что вся поверхность коллектора находится при температуре жидкости на входе $t_{\text{вх.}}$. Множитель F_R является поправкой, уменьшающей значение полезной энергии до реальных значений при такой замене.

Если средняя температура абсорбера известна (из опыта), то необходимость в множителе F_R отпадает, а полезная мощность УСГВ в рабочем режиме определяется формулой

$$Q_{\text{пол.}} = A[I(t_a) - U_L(t_{\text{п}} - t_a)]. \quad (8)$$

В этой формуле $t_{\text{п}}$ определяется из табл. 2, U_L – из табл. 4 (его среднее значение).

Проведем сравнительные расчеты полезной мощности модели УСГВ по формуле (8) с использованием результатов опытов ($t_{\text{п}}$, U_L) и фактической полезной тепловой мощностью модели, определенной в эксперименте (табл. 3):

$$Q_{\text{пол.}}^* = g_{\text{ТН}} C_p (t_{\text{вых.}} - t_{\text{вх.}}) (\text{Вт}). \quad (9)$$

Результаты расчетов приведены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5

Сравнительные расчеты теоретической и фактической полезной мощности

Параметры	Время суток					
	9.00-10.00	10.00-11.00	11.00-12.00	12.00-13.00	13.00-14.00	14.00-15.00
Теоретическая мощность, $Q_{\text{пол.}}$, Вт	разогрев	35,6	44,4	35,0	20,0	11,4
Экспериментальная мощность, $Q_{\text{пол.}}^*$, Вт	разогрев	35,03	45,25	34,7	18,0	10,8

Относительное расхождение теоретических и экспериментальных вычислений полезной мощности $e_Q = \frac{Q_{\text{пол.}} - Q_{\text{пол.}}^*}{Q_{\text{пол.}}} \cdot 100\%$ составляет 1,5...5 %, что является вполне удовлетворительным результатом для теплотехнических экспериментов.

Выводы

1. Исследование малогабаритной УСГВ с естественной циркуляцией теплоносителя имеет самостоятельное значение для опытного определения основных параметров термосифонной УСГВ.

2. Отработаны методы определения температурных полей для подобных по конструкции установок.

3. Разработаны методы определения параметров эффективности термосифонных установок: коэффициента тепловых потерь U_L и равновесной температуры коллектора t_m , что открывает путь к расчету КПД и полезной мощности УСГВ.

4. На основе экспериментальных данных проведены сравнительные расчеты полезной мощности и КПД – теоретические (с использованием опытных данных) и практические (чисто экспериментальные). Достаточно хорошая сходимость результатов подтвердила корректность принятых методик.

5. Для расчетов полномасштабной геометрически подобной установки целесообразно использовать данные по температурным полям (теплоносителя, абсорбера), коэффициент тепловых потерь U_L , равновесные температуры t_m , оценку удельной производительности по горячей воде.

6. Наличие результатов исследования модели существенно упрощает расчеты параметров натурной установки.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ ТЕРМОСИФОННОЇ УСТАНОВКИ СОНЯЧНОГО ГАРЯЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ

В.О. Якимов, В.В. Кувшинов, М.В. Кузнєцов, С.Г. Осетров

Приведені результати першого досвіду фізичного моделювання установки сонячного гарячого водопостачання (УСГВ) з термосифонним плоским колектором. Визначені можливості оцінки параметрів повномасштабної УСГВ з природною циркуляцією (ПЦ) теплоносія за результатами модельних дослідів. Модель УСГВ розроблена і створена на кафедрі "Енергозбереження і нетрадиційних джерел енергії".

EXPERIMENTAL RESEARCH of THERMOSIPHON PLANT MODEL of SOLAR HOT WATER-SUPPLY

V. Yakimov, V. Kuvshinov, M. Kuz'min, S. Osetrov

The first experience of the physical modelling of the solar hot water-supply (SHWS) plant with the thermosiphon flat collector has been resulted. Possibilities of the parameters estimation of the full-scale SHWS with natural heat-carrier circulation by model experiments results were determined. The SHWS model was designed and constructed at the department of «Energy-savings and untraditional energy sources».

Список использованных источников

1. *Повх И.Л.* Техническая гидромеханика / И.Л. Повх. – Л.: Машиностроение, 1976. – 502 с.
2. Климат СССР: справочник. – Вып. 10. – Ч. 3. Солнце. Украинская ССР. – Л.: Наука, 1967.
3. *Якимов В.А.* Експериментальне дослідження параметрів ефективного плоского сонячного колектора з фотоелектричним джерелом енергії / В.А. Якимов, В.В. Кувшинов // Зб. наук. пр. СНУЯЕтаП. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2006. – Вып. 4 (20). – С. 162 - 168.
4. *Даффи Дж. А.* Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Дж.А. Даффи, У.А. Бекман. – М.: Мир, 1988. – 413 с.

Надійшла до редакції 27.05.2013 р.