



УДК 644.62: 621.3.032.272.003.13

Гук В. И., Чабанова А. В.¹

УПРОЩЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВКИ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ СОЛНЕЧНОГО КОЛЛЕКТОРА

Статья посвящена исследованию работы установки горячего водоснабжения на основе солнечного коллектора. По шагам описано алгоритм расчета экономической эффективности установки. При расчете используются усредненные значения солнечной облученности, что приводит к упрощению расчетов.

Ключевые слова: солнечная установка горячего водоснабжения, солнечный коллектор, экономическая эффективность, средние значения солнечной облученности, срок окупаемости.

ВСТУПЛЕНИЕ

Использование солнечной энергии для выработки тепловой и электрической энергии в условиях подорожания традиционных энергоносителей считается одним из перспективных направлений энергетики и находит все большее распространение в странах Европы. В условиях Украины чаще всего применяются солнечные коллекторы

¹ Рецензент – д. э. н., доцент Савченко С. О.



для отопления и горячего водоснабжения индивидуальных жилых домов. При принятии решений о покупке и установке таких систем большинство потребителей пытаются решить для себя вопрос: окупится ли солнечная установка, а если да – то за какое время.

Для проведения оценочных расчетов сроков окупаемости капиталовложений на сайтах фирм, занимающихся продажей и установкой солнечных коллекторов, размещаются всевозможные интерактивные «солнечные калькуляторы» [1, 2, 3]. Однако алгоритмы расчета экономической эффективности солнечных систем не стандартизованы и разработчиками обычно не приводятся. Поэтому результаты расчетов могут существенно отличаться, что часто приводит к разочарованию потенциальных пользователей солнечных систем.

ФОРМУЛИРОВАНИЕ ЗАДАНИЯ

Целью настоящей статьи является разработка единого подхода к упрощенному расчету системы горячего водоснабжения на основе солнечного коллектора.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчет экономической эффективности солнечной установки основан на оценке средних значений солнечной радиации в месте установки системы, а также на правильном определении требуемой производительности, схемно-структурного состава установки, и стоимости отдельных элементов [4]. В условиях Украины в качестве индивидуальной установки горячего водоснабжения чаще всего применяется двухконтурная установка [5], структурная схема которой приведена на рис. 1.

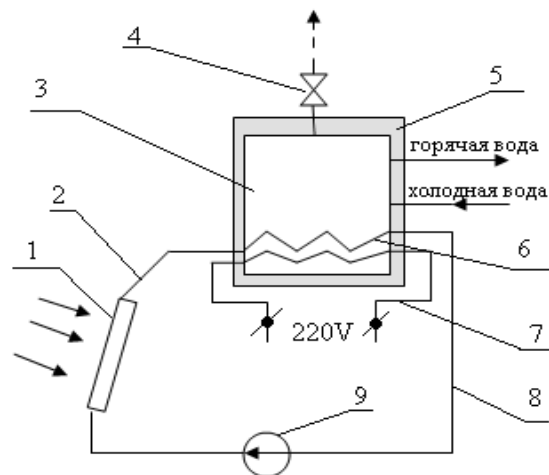


Рис. 1. Схема двухконтурной солнечной установки

- 1 – коллектор солнечной энергии; 2 – трубопровод подъемный; 3 – бак-теплообменник; 4 – воздухопускной клапан; 5 – теплоизоляция; 6 – змеевик; 7 – дублирующий электрический нагревательный элемент (ТЭН); 8 – трубопровод опускной; 9 – циркуляционный насос



Солнечная двухконтурная водонагревательная установка состоит из:

1) плоского солнечного коллектора (1), в котором поток лучистой энергии солнца поглощается и нагревает изогнутые в змеевик трубки, заполненные теплоносителем-антифризом;

2) бойлера (3), т. е. теплоизолированного бака-теплообменника, заполненного водой, поступающей из водопровода через нижний патрубок, нагреваемой в теплообменнике и поступающей через верхний патрубок в систему горячего водоснабжения. В теплообменнике теплоноситель-антифриз отдает свое тепло воде;

3) циркуляционного насоса (9) для принудительной прокачки теплоносителя-антифриза по первому контуру;

4) дублирующего электрического нагревательного элемента (ТЭНа) (7), расположенного в бойлере и служащего для нагрева воды при длительном отсутствии солнечного излучения или недостаточной температуре теплоносителя.

Для расчета системы горячего водоснабжения необходимо задать исходные данные, определяющие требования к системе горячего водоснабжения индивидуального жилого дома. Для дома, расположенного в г. Черкассы, в котором проживает семья из 4-х человек, можно принять следующие исходные данные:

1. Количество жильцов дома, l	4 чел.
2. Среднее суточное потребление горячей воды, N /сут.....	50л/чел.
3. Коэффициент запаса, k_3	1,5
4. Температура горячей воды, $t_{гор}$	60 ⁰ С
5. Средняя температура холодной воды, $t_{хол}$	10 ⁰ С
6. Географическое положение (г. Черкассы)	
географическая широта.....	49,57° с. ш.
географическая долгота.....	23,91° в. д.
7. Сезонность работы установки.....	круглогодично
8. Параметры вакуумного солнечного коллектора	
Марка коллектора	СВК-НР-30
Количество вакуумных трубок	30шт
Коэффициент полезного действия η	0,9
Размеры.....	2,0x2,44x0,12
Вес.....	73кг
Площадь апертуры 1 трубки	0,086м ²
Устойчивость к перегреву.....	400 ⁰ С
Устойчивость к замерзанию	50 ⁰ С
Срок службы	до 25 лет
Цена солнечного коллектора	8576 грн



Алгоритм расчета состоит из следующих шагов:

Шаг 1. Нахождение объема бойлера и температурного перепада

Объем бойлера определяется по формуле

$$V = k_{\zeta} \cdot l \cdot n \quad (1)$$

и для 4-х человек составляет $V = 1,5 \cdot 4 \cdot 50 = 300$ л

Температурный перепад, т. е. разность температур воды на входе и на выходе бойлера находится по формуле

$$\Delta T = t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}} \quad (2)$$

и составляет $\Delta T = 60^{\circ} - 10^{\circ} = 50^{\circ}$

Шаг 2. Определение количества энергии для нагрева воды

Для нагрева 1 литра воды на 1 градус необходимо затратить энергию, равную 1 Ккал, а для нагрева V литров на ΔT градусов нужно затратить

$$Q = V \cdot \Delta T = 300 \cdot 50 = 15000 \text{ Ккал}$$

Для перевода килокалорий в киловатт-часы воспользуемся соотношением $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 859,8 \text{ Ккал}$, поэтому

$$Q [\text{кВт}] = 15000 / 859,8 \approx 17,45 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Шаг 3. Определение среднего количества солнечной энергии, которое поступает на солнечный коллектор за день

Данные о средних значениях солнечной облученности горизонтальной поверхности по основным городам Украины [6] приведены в табл. 1.

Таблица 1

Облученность горизонтальной площадки в основных городах Украины

Географическое положение			Среднесуточная облученность солнцем горизонтальной поверхности (кВт/м ² /day)												
Населенный пункт	Сев. широта	Вост. долгота	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	Среднее годовое
Донецк	47,95	37,82	1,25	2,04	2,93	4,11	5,57	5,72	5,83	5,18	3,82	2,35	1,26	0,99	3,4208
Киев	50,43	30,54	1,07	1,87	2,95	3,96	5,25	5,22	5,25	4,67	3,12	1,94	1,02	0,86	3,0983
Львов	49,84	24,01	1,09	1,86	2,85	3,85	4,84	5,00	4,93	4,51	3,08	1,91	1,09	0,85	2,9883
Севастополь	44,61	33,54	1,21	2,04	3,21	4,84	6,29	7,05	7,26	6,26	4,59	2,89	1,53	1,01	4,0150
Черкассы	49,57	23,91	1,08	1,83	2,82	3,78	4,67	4,83	4,83	4,45	3,00	1,85	1,06	0,83	2,9192
Ялта	44,26	34,19	1,27	2,06	3,05	4,3	5,44	5,84	6,2	5,34	4,07	2,67	1,55	1,07	3,5717

Согласно данным таблицы среднегодовое значение солнечной облученности горизонтальной площадки для г. Черкассы составляет $E_{cp} = 2,92 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{день})$



Шаг 4. Определение ежедневной облученности наклонной площадки

Положение солнца относительно наклонной площадки, расположенной в заданной местности, определяется следующими углами [7]:

φ – географическая широта местности;

δ – склонение, т. е. угловое положение Солнца в солнечный полдень относительно плоскости экватора;

s – угол наклона приемной площадки (т. е. угол между плоскостью приемной площадки и плоскостью горизонта);

γ – азимутальный угол наклона приемной площадки, т.е. отклонение нормали от местного меридиана (за начало отсчета принимается южное направление, отклонение к востоку считается положительным, к западу – отрицательным);

ω – часовой угол, определяющий отклонение направления на солнце от этого направления в полдень (в солнечный полдень этот угол равен нулю; за каждый час угол изменяется на 15° долготы, причем значения часового угла до полудня считаются положительными, а после полудня – отрицательными);

θ – угол падения прямого солнечного излучения, измеряется между направлением излучения и нормалью к приемной площадке.

Для упрощения вычисления угла падения θ приемная площадка всегда может быть условно перенесена в воображаемое место на земном шаре, в котором площадка имеет горизонтальную ориентацию (см. рис. 2).

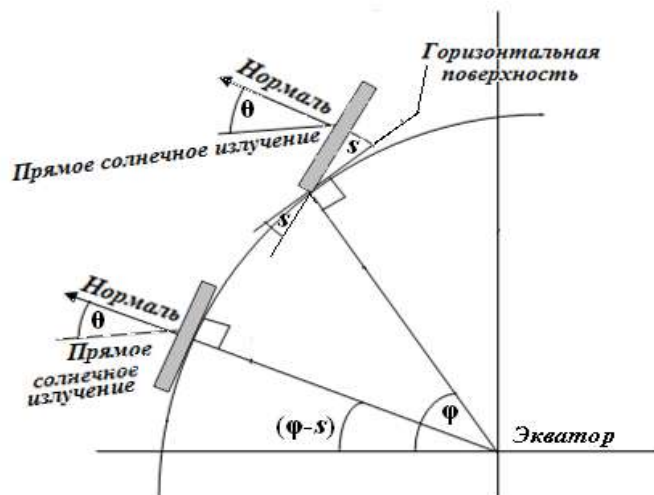


Рис. 2. Перенос наклонной приемной площадки в воображаемое место



Солнечное склонение δ в произвольный n -й день года может быть найдено по приближенной формуле Купера [7]:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin[360 \cdot ((284 + n) / 365)] \quad (3)$$

где n – порядковый номер дня года.

Соотношение между θ и другими углами можно записать в следующем виде [5]:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos s - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos y + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos s \cdot \cos \omega + \\ & + \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \sin s \cdot \cos y \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin s \cdot \sin y \cdot \sin \omega \end{aligned} \quad (4)$$

Среднемесячные дневные поступления солнечной радиации на наклонную поверхность отличаются от поступлений на горизонтальную поверхность на коэффициент ρ [8]:

$$E_n = \rho E, \quad (5)$$

где E – среднемесячная величина дневного поступления радиации на горизонтальную поверхность, кДж/ ($\text{м}^2 \times \text{сутки}$);

ρ – коэффициент облученности наклонной площадки, равный отношению среднемесячной величины дневного поступления радиации на наклонную площадку к среднемесячной величине дневного поступления солнечной радиации на горизонтальную площадку.

Чтобы определить коэффициент облученности ρ , можно воспользоваться формулой [9]:

$$\rho = \frac{\cos \theta}{\sin \alpha} \quad (6)$$

где α – угол высоты солнца над горизонтом, а значение $\cos \theta$ находится по формуле (4).

Расчет значения коэффициента облученности наклонной площадки ρ по формулам (6) и (4) очень громоздкий, поэтому удобно воспользоваться табличными значениями [10], приведенными в таблице 2.

Учитывая то, что ориентация солнечного коллектора для круглогодичной работы традиционно выбирается в направлении на юг с наклоном к горизонту, равным широте местности [6] (т. е. $y = 0$ и $s = \varphi$), значения среднемесячного коэффициента ρ для г. Черкассы выбираются из выделенной жирным шрифтом строчки таблицы 2.



Таблица 2
Среднемесячные значения коэффициента ρ облученности наклонной поверхности при южной ориентации и различных углах наклона

Угол наклона коллектора к горизонту	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Широта местности 40 градусов											
25	1,7	1,49	1,3	1,13	1,04	1	1,01	1,08	1,22	1,4	1,66	1,86
40	2,24	1,72	1,36	1,11	0,97	0,9	0,93	1,03	1,024	1,66	2,03	2,46
60	2,4	1,79	1,33	1,03	0,8	0,78	0,81	0,94	1,17	1,66	2,18	2,72
90	2,3	1,4	0,91	0	0	0	0	0	0,76	1,17	1,96	2,61
	Широта местности 45 градусов											
30	2,14	1,71	1,42	1,1	1,07	1,02	1,04	1,13	1,3	1,56	1,96	2,31
45	2,86	1,99	1,49	1,17	1	0,92	0,95	1,08	1,33	1,74	2,47	3,27
60	3,13	2,07	1,45	1,09	0,89	0,8	0,84	0,99	1,26	1,76	2,66	3,64
90	3,04	1,81	0,99	0,71	0	0	0	0	0,89	1,37	2,5	3,63
	Широта местности 50 градусов											
35	2,77	2,01	1,57	1,27	1,11	1,05	1,08	1,19	1,42	1,79	2,44	3,12
50	4,06	2,38	1,65	1,24	1,04	0,95	0,98	1,33	1,44	2	3,22	5,17
65	4,46	2,47	1,61	1,16	0,93	0,82	0,87	1,04	1,37	2,02	3,47	5,9
90	4,46	2,26	1,3	0,84	0	0	0	0,72	1,06	1,77	3,36	6,04
	Широта местности 55 градусов											
40	4	2,47	1,79	1,37	1,17	1,09	1,12	1,26	1,56	2,11	3,27	4,91
55	3,37	2,99	1,87	1,34	1	0,99	1,03	1,21	1,59	2,38	4,81	5,85
70	9,29	3,11	1,83	1,26	0,98	0,87	0,91	1,11	1,51	2,41	5,2	6,4
90	9,52	2,95	1,57	1	0,73	0	0	0,84	1,26	2,2	5,17	6,45
	Широта местности 60 градусов											
45	7,53	3,23	2,08	1,49	1,25	1,15	1,19	1,36	1,76	2,59	5,03	14,42
60	8,85	4,11	2,18	1,46	1,16	1,04	1,09	1,3	1,8	2,96	13,71	17,29
75	9,57	4,28	2,13	1,38	1,05	1,92	0,97	1,12	1,7	3,01	15	18,99
90	9,64	4,16	1,92	1,16	0,85	0,74	0,77	1,01	1,52	2,85	15,26	19,39

Зная среднемесячные значения коэффициента облученности наклонной площадки ρ и соответствующие среднемесячные значения облученности горизонтальной площадки (см. табл. 1), можно произвести расчет количества среднемесячного поступления солнечной радиации на наклонную поверхность. Результаты такого расчета для г. Черкассы приведены в таблице 3.



Таблиця 3

Среднемесячные ежедневные поступления солнечной радиации на наклонную поверхность в городе Черкассы

Месяцы	Широта местности 50 градусов												ср. месячное значение
	Январь	Февраль	март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	
Угол наклона коллектора к горизонту 50°	4,06	2,38	1,65	1,24	1,04	0,95	0,98	1,33	1,44	2	3,22	5,17	2,12
Солнечная инсоляция гор. поверхности	1,15	1,91	2,94	3,99	5,44	5,46	5,54	4,87	3,4	2,13	1,09	0,91	3,24
Солнечная инсоляция наклонной поверхности	4,67	4,55	4,85	4,95	5,66	5,19	5,43	6,48	4,90	4,26	3,51	4,70	4,93

Шаг 5. Определение количества вакуумных трубок солнечного коллектора

На основании таблицы 3 и технических характеристик вакуумного солнечного коллектора можно найти среднее количество энергии, которое вырабатывает одна вакуумная трубка за день:

$$Q_{\text{тр}} = E_{\text{н}} * f_{\text{тр}} * \eta, \quad (7)$$

где $E_{\text{н}}$ – среднее значение солнечной радиации, которая падает на наклонную площадку;

$f_{\text{тр}}$ – площадь апертуры 1 вакуумной трубки;

η – оптический КПД солнечного коллектора.

Учитывая, что для солнечного вакуумного коллектора марки СВК площадь апертуры составляет $f_{\text{тр}} = 0,086 \text{ м}^2$, получаем следующие значения $Q_{\text{тр}}$:

среднее за год $Q_{\text{тр}} = 4,93 * 0,9 * 0,086 \approx 0,382$

среднее в августе $Q_{\text{тр}} = 6,48 * 0,9 * 0,086 = 0,502$

среднее в ноябре $Q_{\text{тр}} = 3,51 * 0,9 * 0,086 = 0,272$

Для наихудшего для города Черкассы месяца – ноября, находим количество трубок, необходимых для выработки нужной энергии:



$$m = \frac{17.45}{0.272} \approx 64$$

Учитывая, что коллектор СВК-НР-30 состоит из 30 трубок, будем считать, что установка горячего водоснабжения должна содержать два таких коллектора.

Шаг 6. Определение стоимости установки

Стоимость основных комплектующих составит:

Наименование	Цена, грн.	Количество, шт.	Сумма, грн
Коллектор СВК-НР-30	8576	2	17152
Бойлер Atlantic VSRS 300L	6223	1	6223
Работы по монтажу и установке (30% от стоимости)			7013
Всего			30370

Шаг 7. Определение срока окупаемости

Учитывая действующий тариф на электроэнергию в размере 0,3648грн за 1 кВт*ч, получаем, что для обеспечения нагрева горячей воды бойлером Atlantic VSRS 300L (мощность 3000 Вт, время нагрева воды 5,76 ч) ежедневное потребление электроэнергии составит

$$3\text{кВт} \cdot 5,76 \text{ ч} = 17,28 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Ежегодный расход электроэнергии составит $17,28 \cdot 365 = 6307,2$ кВт*ч.

То есть сумма оплаты за год составит $6307,2 \cdot 0,3648 = 2300,87$ грн.

Для определения срока окупаемости солнечной установки по сравнению с установкой электрического нагрева следует из стоимости солнечной установки вычесть стоимость бойлера и полученную сумму разделить на ежегодную сумму оплаты за электроэнергию:

$$\frac{(30370 - 6223)}{2300.87} \approx 10.5 \text{ \u044d\u0430\u0434}$$

Таким образом, срок окупаемости солнечной установки составит 10,5 лет при сроке службы вакуумного коллектора 25 лет.

В случае изменения (повышения) тарифов на электроэнергию в течение срока службы коллектора срок окупаемости соответственно уменьшится.

ВЫВОДЫ

- 1) Предложена упрощенная методика для оценочного расчета экономической эффективности установки горячего водоснабжения.
- 2) После проведения оценочного расчета экономической эффективности и грубого определения параметров солнечной установки горячего водоснабжения следует провести



теплотехнический расчет этой установки и уточнить ее технические параметры.

- 3) В нынешнее время, когда практически каждый год характеризуется аномальными погодными условиями, для оценки параметров солнечного коллектора желательно использовать уточненный метод расчета, который будет учитывать реальные данные о величине солнечной облученности в каждый день прошедшего года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солнечный калькулятор. Расчет экономической эффективности использования теплового насоса Онлайн (Online) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.reikon.ru/heat_pump/hp_calculation-online.php - Способы отопления и снабжения горячей водой.
2. Онлайн-калькулятор. Расчет получаемой энергии от солнечных батарей. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://allcalc.ru/node/353> - Солнечная энергия.
3. СИТИС: Солярис 5.15. Расчет инсоляции для любых географических координат и на любую дату. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sitis.ru/soft/solaris> - Расчет продолжительности инсоляции жилых зданий и территорий в соответствии с методикой расчета инсоляции, приведенной в СанПиН 2.2.1/2.1.1.1076-01.
4. Рекомендации. Рекомендации по технико-экономическому обоснованию применения нетрадиционных солнечных и солнечно-теплонасосных систем теплоснабжения на гражданских и промышленных объектах [Электронный ресурс]. – СНИПы, нормативы, документация. Информационная система СНИПов.НЕТ. – Режим доступа: http://snipov.net/c_4649_snip_101837.html. - Директивные письма, положения, рекомендации и др.
5. ВСН 52-86. Установки солнечного горячего водоснабжения. Нормы проектирования. [Электронный ресурс]. – СНИПы, нормативы, документация. Информационная система СНИПов.НЕТ. – Режим доступа: http://snipov.net/c_4631_snip_95981.html#i125867 - Нормативные документы на инженерное оборудование зданий и сооружений и внешние сети.
6. СНиП 2.04.01-85. Внутренний водопровод и канализация зданий.
7. Средний месячный уровень солнечной радиации в городах Украины. [Электронный ресурс]. – АТМОСФЕРА.UA Технологии природы. – Режим доступа: <http://solar.atmosfera.ua/ru/articles/solar-insulation-ukraine/> – Средний показатель солнечной постоянной за последние 22 года (По данным NASA).
8. Даффи Дж. А., Бекман У. А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. – М. : Мир, 1977. – 420 с.
9. Сарнацкий Э. В. Системы солнечного тепло- и хладоснабжения/ Сарнацкий Э. В., Чистович С. А. – М. : Стройздат, 1990. – с. 144.
10. Бекман У., Клейн С., Даффи Дж. Расчет систем солнечного теплоснабжения. – М. : Энергоиздат, 1982. – 80 с.

Дата надходження до редакції – 07.05.2012