

Украинский научно-исследовательский и проектный институт
по гражданскому строительству (КиевЗНИИЭП)

Центр энергосбережения

Солнечные установки горячего водоснабжения

Пособие по проектированию

Киев – 2006

УДК 697.329

Солнечные установки горячего водоснабжения.

Пособие по проектированию

Изд. КиевЗНИИЭП, 2006. – 26 с.

Автор – Гершкович В.Ф., канд. техн. наук.

Пособие предназначено для использования при проектировании солнечных установок горячего водоснабжения строящихся или реконструируемых жилых и общественных зданий.

Табл.6. Ил.6. Библ. 7.

Одобрено Научно-техническим советом КиевЗНИИЭП.

Протокол № 12 от 7 декабря 2006 г.

Отзывы, пожелания и предложения читателей по содержанию книги, а также вопросы, связанные с проектированием солнечных систем, просим направлять по адресу:

01133, Киев-133, бульв. Леся Украинки, 26 КиевЗНИИЭП

тел. (044)285-65-40. E-mail: ces@zniep.kiev.ua

© Изд. КиевЗНИИЭП, 2006

Содержание	Стр.
1. Оценка актуальности применения солнечных коллекторов	3
2. Область применения коллекторов	4
3. Основные элементы солнечного водоподогревателя	6
4. Определение теплопроизводительности солнечной установки	7
5. Принципы конструирования солнечных установок	13
6. Примеры расчета солнечных установок	15
Литература	21
Приложение. Особенности проектирования солнечных термосифонных систем	22

1. Оценка актуальности применения солнечных систем теплоснабжения

Современная техника позволяет преобразовать лучистую энергию Солнца в теплоту, пригодную для использования.

В условиях Украины с одного квадратного метра солнечного водоподогревателя в течение летнего эксплуатационного сезона при самых благоприятных погодных условиях и безупречной эксплуатации можно получить столько же тепла, сколько выделяется при сгорании 50 м^3 природного газа. Это означает, что при цене 100 долларов за 1000 м^3 на каждом квадратном метре удастся сэкономить не более 5 долларов в год, в то время как стоимость солнечной установки, отнесенная к одному квадратному метру простейшего плоского коллектора, превышает 250 – 300 долларов. Срок ее окупаемости при этом – более половины столетия при долговечности не более 15 – 20 лет. Поэтому в Украине солнечная энергия для теплоснабжения пока практически не используется.

Даже при стоимости газа в Украине 350 долларов за 1000 м^3 срок окупаемости солнечной водоподогревательной установки будет за пределами 15 лет, что не может быть привлекательным для большинства инвесторов.

В перспективе ближайших лет доля природного газа в топливном балансе страны будет неуклонно снижаться. Этому способствуют не только быстро растущие цены на газ, но и постоянно сокращающиеся возможности его импорта. В этой ситуации целесообразно сопоставлять солнечные установки горячего водоснабжения не только с газовыми, но и с электрическими водоподогревателями.

С одного квадратного метра солнечного коллектора в течение летнего сезона можно получить столько же тепла, сколько выделяется при использовании для подогрева воды 465 кВт-часов электрической энергии. До мая 2006 года тариф на электрическую энергию для населения составлял 0,156 грн. за кВт-час. Таким образом, на каждом квадратном метре солнечного коллектора можно было сэкономить не более 73 грн. в год, в то время как стоимость солнечной установки, отнесенная к одному квадратному метру простейшего плоского коллектора, превышает 1250 грн. Таким образом, если солнечную установку горячего водоснабжения сопоставлять с установкой электрического нагревания воды, то срок окупаемости такой установки оценивался примерно в 17 лет.

В конце 2006 года электроэнергия продается населению по цене около 0,25 грн. за кВт-час. В этих условиях на каждом квадратном метре солнечного коллектора можно сэкономить около 116 грн. в год, и срок окупаемости при этом приблизится к 10 годам. Это тоже слишком большой срок для эффективных инвестиций.

Вместе с тем, известно, что во многих странах солнечные водоподогреватели применяются достаточно широко. Чтобы оценить возможности использования солнечных коллекторов в Украине, важно понять причины их активного использования за рубежом.

Таких причин три.

1. Государство *помогает* тем, кто покупает солнечные коллекторы. Производители продают коллекторы со скидками, потери от которых возмещает им государство.

2. Государство *заставляет* инвесторов, вкладывающих деньги в новое строительство, применять солнечные коллекторы. Например, в Испании ни одно новое городское здание не может быть построено без солнечных водоподогревателей.

3. Государства и средства массовой информации во многих странах *создают атмосферу стимуляции* всяческих мер, направленных на экономию топлива и защиту окружающей среды. Поэтому применение солнечных коллекторов в этих странах престижно, в то время как абсолютная величина затрат на устройство солнечных водоподогревателей не пугает тех, чьи доходы по западным меркам достаточны для полноценной жизни.

В Украине эти факторы, способствующие широкому применению солнечных коллекторов, пока не работают, хотя фактор престижности применительно к солнечным установкам присутствует, и его роль будет со временем возрастать. Кроме того, будут расти цены на природный газ и электроэнергию. Во многих городских домах централизованное горячее водоснабжение вообще не включают летом, и солнечные установки при наличии у жителей достаточных денежных средств могли бы в теплое время года делать работу, которую перестали выполнять коммунальные службы.

Таким образом, факторы, сдерживающие использование солнечной энергии в Украине, уже начали уравниваться обстоятельствами, способствующими ее использованию. Одним из сдерживающих факторов является отсутствие информации, необходимой для проектирования солнечных систем, и издание этого пособия, возможно, устранил этот фактор.

2. Область применения солнечных коллекторов

Солнечным коллектором называют устройство, которое принимает лучистую энергию Солнца и преобразовывает ее в теплоту, пригодную для использования. Коллекторы бывают плоские и вакуумные. Коэффициент полезного действия вакуумных коллекторов при высоких температурах теплоносителя выше, чем у плоских (рис. 1), но они гораздо дороже.

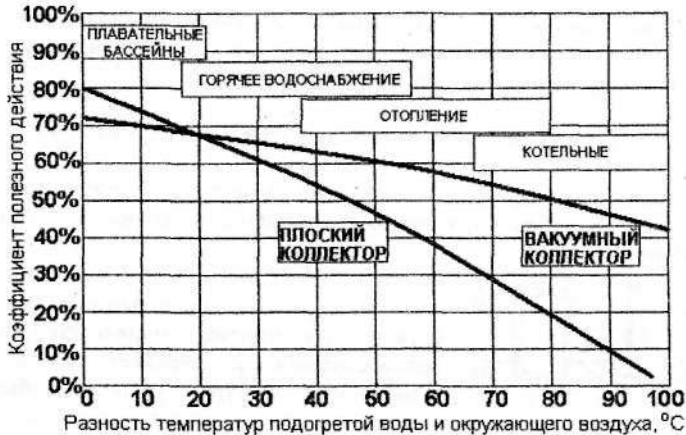


Рис. 1 Области применения солнечных водоподогревателей и зависимость коэффициента полезного действия плоского и вакуумного солнечных коллекторов от разности температур подогретой воды и окружающего воздуха [1]

Преимущественной областью применения плоских солнечных коллекторов является подогрев в теплое время года воды, используемой в системе горячего водоснабжения. В этих системах разность температур подогретой воды и окружающего солнечный коллектор воздуха обычно лежит в интервале $20...40^{\circ}\text{C}$, в котором более дешевые плоские коллекторы работают с коэффициентом полезного действия, отличающимся не более чем на 7% от КПД очень дорогого вакуумного коллектора.

Хорошо смонтированные плоские солнечные коллекторы красиво вписываются в скатную кровлю односемейного дома, и их применение в коттедже всегда привлекательно.

Применение солнечных коллекторов в городских многоэтажных зданиях может быть обосновано тем, что в период проведения летних ремонтов и гидравлических испытаний теплотрасс жители смогут пользоваться горячей водой, не ощущая неудобств от этой деятельности теплоснабжающих организаций.

При применении солнечных коллекторов в системах отопления их КПД резко понижается (рис. 1), и для получения заметного количества тепла приходится применять дорогие вакуумные солнечные коллекторы, в то время как количество часов, когда наблюдается прямое солнечное излучение, составляет лишь небольшую часть отопительного периода. Этими факторами определяется неэкономичность солнечных отопительных систем, область применения которых ограничивается только

экспериментальными или показательными зданиями. По этой причине солнечные системы отопления в этом пособии, предназначенном для широкого круга проектировщиков, не рассматриваются.

3. Основные элементы солнечного водоподогревателя

Солнечная установка горячего водоснабжения, предназначенная для автономного (без применения других источников тепла) теплоснабжения, как

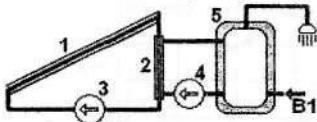


Рис. 2 Элементарная схема автономной солнечной установки водоснабжения

1-солнечный коллектор,
2-теплообменник, 3 и 4 –
насосы первичного и
вторичного контуров
циркуляции,
5-бак-аккумулятор

правило, состоит из пяти основных элементов (рис.2). Солнечный коллектор 1 служит для приема солнечного тепла, теплообменник 2 передает тепло от первичного контура, который обычно заполняют незамерзающей жидкостью, во вторичный контур, насосы 3 и 4 обеспечивают циркуляцию в каждом из контуров, а в баке-аккумуляторе 5 накапливается горячая вода перед тем, как она будет израсходована в системе горячего водоснабжения.

Иногда проектировщики пытаются исключить некоторые из основных элементов, но такое «упрощение» приводит к ухудшению эксплуатационных качеств солнечной установки. Например, можно было бы обойтись без теплообменника, но тогда солнечный коллектор будет подвергнут повышенной опасности коррозии, и в нем будут отлагаться соли жесткости. Кроме того, его придется на зиму опорожнять от воды, чтобы он не заледенел, и заполнять азотом, чтобы не ржавел.

Если не устанавливать бак-аккумулятор, то даже кратковременное затенение солнечного коллектора случайным облаком станет причиной прекращения подогрева.

Поэтому в дальнейшем изложении упрощенные схемы приготовления горячей воды не рассматриваются.

Особое место в технике использования солнечной энергии принадлежит солнечной термосифонной системе, которая обладает рядом достоинств, позволяющих с успехом применять ее в ряде случаев. Особенности проектирования таких систем приведены в приложении.

4. Определение теплопроизводительности солнечной установки горячего водоснабжения

Тепловая мощность солнечной установки зависит от теплового потока, который несет с собою прямое H_B и рассеянное H_D солнечное излучение, падающее на широте φ данной местности на горизонтальную плоскость. Эти данные, заимствованные из климатического справочника [2], приведены в таблице 1.

Тепловой поток, Вт, прямого H_B и рассеянного H_D солнечного излучения, падающего на 1 м^2 горизонтальной поверхности при безоблачном небе

Таблица 1

Месяц, склонение	Широта φ местности	H	Часы суток до полудня						
			6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	
март $\delta = -3^\circ$	44°	H_B	35	185	335	454	540	628	
		H_D	35	63	67	105	111	119	
	46°	H_B	35	171	307	425	513	600	
		H_D	35	66	98	111	119	126	
апрель $\delta = +10^\circ$	44°	H_B	111	258	404	557	633	710	
		H_D	70	90	11	125	132	139	
	46°	H_B	111	251	390	536	612	689	
		H_D	77	94	111	132	136	139	
	48°	H_B	111	247	383	529	595	661	
		H_D	77	90	104	132	136	139	
	50°	H_B	125	251	375	522	585	647	
		H_D	70	87	104	125	129	132	
	52°	H_B	125	251	376	501	567	633	
		H_D	70	84	97	125	129	132	
	май $\delta = +18^\circ$	44°	H_B	202	341	480	649	713	780
			H_D	77	94	111	118	125	132
46°		H_B	209	341	473	619	693	766	
		H_D	77	94	111	132	132	132	
48°		H_B	216	345	473	612	681	768	
		H_D	77	94	111	132	136	139	
50°		H_B	215	345	473	612	668	724	
		H_D	84	94	104	125	128	132	
52°		H_B	223	348	473	599	637	710	
		H_D	84	94	104	125	125	125	
июнь $\delta = +23^\circ$		44°	H_B	236	380	522	655	730	808
			H_D	77	90	105	118	118	118
	46°	H_B	237	374	509	640	711	780	
		H_D	84	97	111	125	125	125	
	48°	H_B	244	373	500	634	695	759	
		H_D	84	97	111	132	132	132	
	50°	H_B	250	373	494	625	686	745	
		H_D	84	97	111	132	132	132	
	52°	H_B	258	375	494	619	684	745	
		H_D	84	97	111	125	125	125	
				Часы суток после полудня					
				17-18	16-17	15-16	14-15	13-14	12-13

Окончание таблицы 1

Месяц, склонение	Широта ф местности	H	Часы суток до полудня						
			6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	
июль $\delta=+21^{\circ}$	44 ⁰	H_B	181	348	507	619	716	758	
		H_D	84	102	111	125	131	132	
	46 ⁰	H_B	195	348	502	605	699	745	
		H_D	84	99	111	125	128	132	
	48 ⁰	H_B	209	355	494	591	682	731	
		H_D	84	99	111	125	128	132	
	50 ⁰	H_B	216	362	494	584	666	724	
		H_D	84	97	111	125	128	132	
	52 ⁰	H_B	223	362	494	584	664	716	
		H_D	84	100	111	118	125	132	
	август $\delta=+13^{\circ}$	44 ⁰	H_B	125	278	432	537	637	717
			H_D	70	90	111	118	122	125
46 ⁰		H_B	132	278	425	536	606	675	
		H_D	70	87	104	118	125	132	
48 ⁰		H_B	132	275	411	522	588	654	
		H_D	70	87	104	118	125	132	
50 ⁰		H_B	146	275	404	517	579	640	
		H_D	63	84	104	118	122	125	
52 ⁰		H_B	146	275	397	508	571	633	
		H_D	63	84	104	118	115	118	
сентябрь $\delta=+3^{\circ}$		44 ⁰	H_B	70	202	334	508	567	626
			H_D	42	63	84	104	111	118
	46 ⁰	H_B	77	198	320	487	550	612	
		H_D	42	63	84	104	111	118	
	48 ⁰	H_B	63	181	299	466	532	599	
		H_D	49	66	84	104	108	111	
	50 ⁰	H_B	63	181	299	445	512	578	
		H_D	49	66	84	97	101	104	
	52 ⁰	H_B	56	167	278	432	491	550	
		H_D	49	66	84	90	97	104	
	октябрь $\delta=-9^{\circ}$	44 ⁰	H_B	21	108	195	405	457	509
			H_D	9	43	63	84	91	98
46 ⁰		H_B	21	98	174	370	418	467	
		H_D	7	42	63	84	91	98	
			Часы суток после полудня						
			17-18	16-17	15-16	14-15	13-14	12-13	

Величина удельного теплового потока q' , Вт, падающего на 1 м² наклонной поверхности солнечного коллектора в каждый час безоблачного дня, определяется [3] по формуле

$$q' = H_B \frac{\cos(\varphi - s) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - s) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta} + H_D, \quad (1)$$

где φ – широта местности,

s – угол наклона плоскости солнечного коллектора к горизонту,

δ – склонение, величина которого для каждого месяца приведена в таблице 1,

ω – часовой угол, равный нулю в полдень для коллекторов, ориентированных на юг; через каждый час значение часового угла меняется на 15° со знаком плюс (от 12 часов к утру) или минус (от 12 к вечеру). Например, в 11 часов $\omega = +15^\circ$, а в 13 часов $\omega = -15^\circ$.

H_B и H_D – удельный тепловой поток, Вт/м², прямого и рассеянного солнечного излучения, величины которого принимаются по табл. 1.

Удельный тепловой поток q , Вт/м², используемый в системе горячего водоснабжения в каждый час безоблачного дня определяется по формуле

$$q = q' \eta_K \eta_1 \eta_2, \quad (2)$$

где η_K – коэффициент полезного действия солнечного коллектора, который зависит от его конструкции. Данные о зависимости $\eta_K = f(t_K - t_0)$, где t_K – температура подогретой в коллекторе воды, а t_0 – температура окружающего коллектор воздуха, должны сообщаться изготовителем солнечного коллектора. При отсутствии этих данных рекомендуется пользоваться графиком рис. 1, который в диапазоне разности температур $20 \dots 50^\circ\text{C}$ интерпретируется зависимостью

$$\eta_K = 0,82 - 0,007(t_K - t_0) \quad (3)$$

Температура t_K определяется проектом и обычно принимается равной 50°C . Температура t_0 – это средняя температура воздуха атмосферы в дневные часы расчетного месяца, которую рассчитывают по формуле

$$t_0 = t_{CP} + 0,3A_t \quad (4)$$

где t_{CP} и A_t – среднесуточная температура воздуха и максимальная амплитуда колебаний суточных температур расчетного месяца,

принимаемые по нормам [4]. Данные о температуре t_0 для некоторых городов Украины, рассчитанные по формуле 4, приведены в таблицах 2 и 2а;

η_1 – коэффициент, учитывающий степень прозрачности атмосферы, величина которого колеблется от 0,8 в промышленных районах до 1 в курортной зоне. Для горных курортов $\eta_1 = 1,1$;

η_2 – коэффициент, учитывающий потери тепла на пути от солнечного коллектора к потребителю. Величина этого коэффициента колеблется от 0,85 для крупных централизованных систем горячего водоснабжения до 0,98 для локальных водоподогревателей.

Данные о расчетной географической широте φ , град.,
о средней дневной температуре атмосферного воздуха t_0 , °С, и о
коэффициенте η_0 , учитывающем реальные условия облачности,
для некоторых городов Украины

Таблица 2

Город	φ	Месяцы года											
		апрель		май		июнь		июль		август		сентябрь	
		t_0	η_0	t_0	η_0	t_0	η_0	t_0	η_0	t_0	η_0	t_0	η_0
Ялта	44	16	0,71	22	0,77	25	0,84	29	0,86	28	0,88	24	0,85
Симферополь	44	16	0,69	21	0,71	25	0,78	28	0,86	27	0,86	22	0,81
Ужгород	48	16	0,65	22	0,71	24	0,72	27	0,72	26	0,77	23	0,72
Николаев	46	15	0,67	22	0,76	26	0,8	29	0,83	28	0,86	23	0,75
Херсон	46	15	0,67	22	0,76	26	0,8	29	0,83	28	0,86	23	0,75
Запорожье	48	15	0,61	22	0,69	26	0,75	29	0,71	28	0,73	22	0,66
Луганск	48	15	0,62	23	0,71	26	0,74	28	0,76	27	0,8	22	0,71
Одесса	46	14	0,72	21	0,77	25	0,82	28	0,86	27	0,86	23	0,78
Донецк	48	14	0,62	21	0,7	25	0,75	28	0,78	26	0,81	21	0,72
Полтава	50	14	0,56	21	0,64	24	0,71	27	0,72	26	0,7	20	0,67
Харьков	50	14	0,56	21	0,64	25	0,72	27	0,72	26	0,71	20	0,68
Кировоград	48	14	0,61	21	0,68	24	0,76	26	0,72	26	0,73	21	0,66
Киев	50	14	0,61	21	0,68	24	0,75	26	0,72	25	0,74	20	0,67
Черкассы	50	14	0,61	21	0,69	24	0,76	26	0,72	25	0,75	20	0,67
Черновцы	48	14	0,64	20	0,69	20	0,72	25	0,72	24	0,71	20	0,65
Ив-Франковск	48	14	0,63	19	0,68	23	0,72	25	0,73	24	0,71	20	0,64
Винница	48	13	0,61	20	0,67	23	0,75	25	0,72	24	0,72	19	0,65
Луцк	50	13	0,56	20	0,64	23	0,71	25	0,72	24	0,69	19	0,66
Житомир	50	13	0,61	20	0,68	23	0,74	25	0,71	24	0,74	19	0,65
Ровно	50	13	0,58	19	0,66	23	0,73	25	0,73	24	0,72	19	0,66
Тернополь	50	13	0,6	19	0,66	23	0,74	24	0,72	23	0,72	19	0,65
Хмельницкий	48	13	0,61	20	0,67	23	0,75	25	0,72	24	0,72	19	0,65
Львов	50	13	0,56	19	0,64	21	0,72	23	0,73	22	0,7	19	0,67
Чернигов	52	13	0,6	20	0,67	23	0,73	24	0,72	24	0,72	19	0,66
Сумы	52	12	0,59	20	0,66	24	0,72	24	0,72	24	0,7	19	0,64

Таблица 2а

Город	φ	Месяцы года			
		март		октябрь	
		t_0	η_0	t_0	η_0
Ялта	44	13	0,51	19	0,60
Симферополь	44	10	0,51	18	0,60
Николаев	46	8	0,50	16	0,56
Херсон	46	8	0,50	16	0,56
Одесса	46	8	0,50	17	0,56

Значения величины удельного теплового потока, Вт, отводимого с 1 м² солнечного коллектора, численно равное q'_{η_k} , можно рассчитать по формулам 1 и 3 для любого населенного пункта. В таблице 3 приведены результаты расчета, выполненные для самого южного и самого северного городов Украины. Угол наклона солнечного коллектора к горизонту принят 30° в Ялте и 35° в Чернигове.

Тепловой поток, Вт, отводимый с 1 м² ориентированного к югу солнечного коллектора в каждый час безоблачного дня, и количество тепловой энергии, Вт-часов, отводимое с 1 м² от 6 до 18 часов

Таблица 3

Солнечное время	Город	Месяцы							
		3	4	5	6	7	8	9	10
6 – 7	Чернигов	-	83	117	124	118	92	61	-
17 – 18	Ялта	54	94	139	154	141	111	74	-
7 – 8	Чернигов	-	182	223	228	233	208	162	-
16 – 17	Ялта	179	207	255	272	277	242	192	149
8 – 9	Чернигов	-	283	330	334	347	323	265	-
15 – 16	Ялта	289	266	371	391	408	379	311	229
9 – 10	Чернигов	-	391	441	440	431	426	397	-
14 – 15	Ялта	395	440	499	502	511	472	462	428
10 – 11	Чернигов	-	445	480	498	502	482	452	-
13 – 14	Ялта	460	500	556	563	594	556	515	472
11 – 12	Чернигов	-	496	535	545	548	535	505	-
12 – 13	Ялта	528	558	610	621	629	622	567	519
6 – 18	Чернигов	-	3757	4255	4336	4357	4132	3685	-
	Ялта	3807	4130	4860	5002	5120	4764	4240	3597

Площадь F , м², солнечных коллекторов определяется по формуле

$$F = \beta W_c / \Sigma q_i, \quad (5)$$

где W_c – суточная потребность в тепловой энергии, Вт-ч, для горячего водоснабжения, рассчитываемая для жилых домов по формуле

$$W_c = 1,163Nm(55 - t_x), \quad (6)$$

где N – норма потребления одним человеком в сутки горячей воды с температурой 55°С, принимаемая по нормам проектирования внутреннего водопровода зданий [5]. Для солнечных систем горячего водоснабжения рекомендуется принимать минимальную для жилых домов норму 85 л/(чел. сут.);

m – количество жителей;
 t_x – температура воды, $^{\circ}\text{C}$, в холодном водопроводе в летний период;
 β – коэффициент инвестора, принимаемый им в интервале значений $0,5 < \beta < 1,0$ в зависимости от желаемой степени замещения солнечной энергией обычных энергоносителей. При отсутствии других источников энергии для подогрева воды следует принимать $\beta = 1,0$.

Σq_i – сумма значений тепловых потоков, Вт, рассчитанных по формуле 2 для каждого часа солнечного дня в сентябре или в другом самом холодном месяце того периода, в течение которого должен работать солнечный водоподогреватель.

Количество W_M , кВт-часов тепловой энергии, выработанной в солнечном водоподогревателе, вычисляется отдельно для каждого месяца работы по формуле

$$W_M = 10^{-3} z \Sigma q_i F \eta_0 \eta_3, \quad (7)$$

где z – количество дней в месяце;

Σq_i – сумма значений тепловых потоков, Вт, рассчитанных по формуле 2 для рассчитываемого месяца;

F – площадь, м^2 , установленных солнечных коллекторов;

η_0 – коэффициент, учитывающий реальные условия облачности, который можно вычислить по формуле

$$\eta_0 = \frac{\Sigma H_p}{\Sigma(H_R + H_D)}, \quad (8)$$

где ΣH_p – суммарная энергия прямого и рассеянного солнечного излучения, падающего на горизонтальную поверхность в населенном пункте за сутки при реальных условиях облачности. Величина ΣH_p приводится в климатологических справочниках [6];

$\Sigma(H_R + H_D)$ – суммарная энергия прямого и рассеянного солнечного излучения, падающего на горизонтальную поверхность на широте населенного пункта за сутки при безоблачном небе. Величина $\Sigma(H_R + H_D)$ рассчитывается по данным табл. 1.

Коэффициенты η_0 для некоторых городов Украины, рассчитанные по формуле 8, приведены в таблицах 2 и 2а;

η_3 – коэффициент, учитывающий потери, обусловленные нестационарным теплообменом при переменной облачности. Рекомендуется принимать $\eta_3 = 0,9$.

Годовая выработка тепла W_{Γ} , кВт-часов, в солнечной установке определяется как суммарное количество тепловой энергии, выработанной в каждом месяце.

$$W_{\Gamma} = \Sigma W_{M,i} \quad (9)$$

5. Принципы конструирования солнечных установок

Солнечные коллекторы должны быть ориентированы к югу с уклоном к горизонту. Оптимальный угол наклона солнечного коллектора зависит от широты местности и от продолжительности использования солнечной энергии в течение теплового времени года (рис. 3).

Площадь солнечных коллекторов рекомендуется определять по формуле 5. В жилых домах на каждого жителя обычно приходится 1 – 1,5 м² солнечных коллектора

Емкость бака-аккумулятора рассчитывают с учетом суточного графика потребления воды, характерного для жилого дома, и графика поступления солнечной теплоты. Опытom установлено [7], что удельная емкость бака, м³, отнесенная к 1 м² солнечного коллектора должна находиться в интервале значений 0,06 – 0,08.

Производительность G_1 , м³/ч, циркуляционного насоса первичного контура циркуляции (поз. 3 на рис. 2) определяется по формуле

$$G_1 = 3,6(q' \eta_k)_{\max} F / [c_1 \rho_1 (T_1 - T_2)], \quad (7)$$

где $(q' \eta_k)_{\max}$ – удельный тепловой поток, Вт/м², солнечного излучения, отводимый с поверхности коллектора в максимальный для этой поверхности час. Величина $(q' \eta_k)_{\max}$ рассчитывается по формулам 1 и 3. Можно также пользоваться данными таблицы 3, в которой вычислены значения величин $q' \eta_k$ для каждого часа в самом южном и самом северном городах Украины. Максимальные значения величины $q' \eta_k$ для Ялты 629 Вт/м², а для Чернигова 548 Вт/м². Если эти значения принять в качестве отправных величин, то для любого города Украины справедлива приближенная зависимость

$$(q' \eta_k)_{\max} = 1075 - 10,1 \varphi \quad (11)$$

где φ – широта местности, град.

c_1 – теплоемкость, кДж/(кг·ч⁰С), ρ_1 – объемная масса, кг/м³ водного раствора этиленгликоля, циркулирующего в первом контуре. Данные о свойствах водных растворов этиленгликоля приведены в таблице 4.



Рис. 3 Зависимость оптимального угла наклона S , град., солнечного коллектора к горизонту от продолжительности его использования

T_1 и T_2 – расчетные температуры, $^{\circ}\text{C}$, теплоносителя на выходе из солнечного коллектора и на входе в него. Эти температуры при наличии бака-аккумулятора обычно принимают равными соответственно 55 и 40°C .

Данные о концентрации ξ ,%, объемной массе ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$, температуре замерзания t_3 , $^{\circ}\text{C}$, и теплоемкости c , $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ водных растворов этиленгликоля

Таблица 4

ξ , %	ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$	t_3 , $^{\circ}\text{C}$	c , $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ при температурах, $^{\circ}\text{C}$				
			50	20	0	-10	-20
12,2	1015	-5	4,06	4,02	3,98	-	-
19,8	1025	-10	3,98	3,89	3,85	-	-
27,4	1035	-15	3,85	3,77	3,73	3,68	-
35	1045	-21	3,73	3,64	3,56	3,56	-
42,6	1055	-29	3,61	3,48	3,43	3,39	3,35

Давление циркуляционного насоса первичного контура циркуляции определяют по величине гидравлических потерь, включающих в себя потери давления в солнечном коллекторе и в контуре греющей воды теплообменника.

Производительность G_2 , $\text{м}^3/\text{ч}$, циркуляционного насоса вторичного контура циркуляции (поз. 4 на рис. 2) определяется по формуле

$$G_2 = 3,6(q' \eta_K)_{\text{MAX}} F / c_2 \rho_2 (t_1 - t_2), \quad (12)$$

где c_2 – теплоемкость и ρ_1 – объемная масса воды, равные соответственно 4,187 $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$ и $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$;

t_1 и t_2 – расчетные температуры, $^{\circ}\text{C}$, воды на входе в бак-аккумулятор и на выходе из него, которые обычно принимают равными соответственно 50 и 35°C .

Давление циркуляционного насоса вторичного контура циркуляции определяют по величине гидравлических потерь, включающих в себя потери давления в контуре нагреваемой воды теплообменника.

Исходными данными для выбора теплообменника служат расходы жидкостей G_1 и G_2 , температуры T_1 , T_2 , t_1 и t_2 , а также заданные с учетом давлений, развиваемых насосами, величины гидравлических потерь в каждом из контуров теплообменника.

Опорные конструкции солнечных коллекторов должны быть рассчитаны на статическую нагрузку с учетом содержащейся в них массы воды, а также на ветровую нагрузку.

6. Примеры расчета солнечных установок

Пример 1. Для семьи из четырех человек, живущей в коттедже под Черниговом, предполагается установить солнечную систему горячего водоснабжения. Солнечные коллекторы установлены под углом 35° к горизонту и ориентированы на юг. Рассчитать необходимую площадь коллекторов и количество тепла, которое эта установка может выработать за теплый период года от апреля по сентябрь включительно.

Рассчитаем тепловые потоки по каждому часу для шести месяцев работы солнечной системы.

Расчетная таблица к примеру 1

час	H_B	H_D	q'	$\eta_{\text{кп2}}$	q	H_B	H_D	q'	$\eta_{\text{кп2}}$	q
	Вт/м ²	Вт/м ²	Вт/м ²		Вт/м ²	Вт/м ²	Вт/м ²	Вт/м ²		Вт/м ²
апрель						май				
6-7	125	70	171	0,55	94	223	84	230	0,60	137
7-8	251	84	364	0,55	200	348	94	420	0,60	251
8-9	376	97	561	0,55	308	473	104	612	0,60	366
9-10	501	125	772	0,55	424	599	125	812	0,60	485
10-11	567	129	878	0,55	483	637	125	881	0,60	526
11-12	633	132	976	0,55	537	710	125	980	0,60	586
6-18	Всего Вт-часов в сутки				4092	Всего Вт-часов в сутки				4704
июнь						июль				
6-7	258	84	239	0,62	148	223	84	222	0,63	139
7-8	375	97	420	0,62	259	362	100	422	0,63	264
8-9	494	111	603	0,62	373	494	111	618	0,63	386
9-10	619	125	789	0,62	488	584	118	761	0,63	476
10-11	684	125	888	0,62	549	664	125	884	0,63	553
11-12	745	125	970	0,62	600	716	132	964	0,63	602
6-18	Всего Вт-часов в сутки				4834	Всего Вт-часов в сутки				4839
август						сентябрь				
6-7	146	63	170	0,63	106	56	49	114	0,59	67
7-8	275	84	370	0,63	231	167	66	296	0,59	175
8-9	397	104	567	0,63	355	278	84	483	0,59	285
9-10	508	118	744	0,63	465	432	90	721	0,59	426
10-11	571	115	838	0,63	524	491	97	820	0,59	485
11-12	633	118	929	0,63	581	550	104	917	0,59	542
6-18	Всего Вт-часов в сутки				4525	Всего Вт-часов в сутки				3960

Данные в первую (H_B) и вторую (H_D) колонки расчетной таблицы заносятся из таблицы 1 соответственно географической широте города Чернигова (52°).

Величина q' падающей на плоскость солнечного коллектора энергии вычислена по формуле 1 при значениях углов $\varphi = 52^{\circ}$, $s = 35^{\circ}$. Часовой угол $\omega = 7,5^{\circ}$ в интервале времени 11-12 часов с увеличением на 15° для каждого предыдущего временного интервала. Вычисление рекомендуется

выполнять на Excel. При этом нужно помнить, что Excel рассчитывает тригонометрические функции, задаваясь значениями углов, выраженными в радианах. Угол в радианах равен углу в градусах, умноженному на число π и деленному на 180. Например, $35^\circ = 35.3,14/180 = 0,61$ радиана.

Коэффициент полезного действия солнечного коллектора η_k вычислен по формуле 3. Температура t_k принята 50° , а t_0 – по данным таблицы 2. Предполагается, что коттедж, для которого проектируется установка, расположен в курортной зоне. Поэтому $\eta_1 = 1$. Для небольшой локальной установки принято значение $\eta_2 = 0,98$. Эти коэффициенты перемножаются в предпоследней колонке каждого месяца.

Значение в последней колонке получается перемножением значений предыдущих двух колонок.

Сумма величин по каждому часовому интервалу от 6 до 12 часов удваивается, чтобы получилась величина суточной выработки тепловой энергии в солнечных коллекторах в безоблачный день.

Анализируя результаты расчета, приходим к выводу, что меньше всего тепловой энергии вырабатывается в сентябре – всего 3960 Вт-часа в сутки с каждого квадратного метра солнечного коллектора. Суточная потребность коттеджа в горячей воде определяется по формуле 6.

$$Q = 1,163.85.4(55 - 15) = 15817 \text{ Вт-часов в сутки}$$

Необходимая площадь солнечного коллектора определяется по формуле 5 с учетом коэффициента инвестора $\beta = 1,0$.

$$F = 1,0.15817/3960 = 3,99 \text{ м}^2$$

Принимается к установке 4 коллектора площадью 1 м^2 каждый.

Количество W_M , кВт-часов, выработанной в солнечном водоподогревателе тепловой энергии вычисляется отдельно для каждого месяца по формуле 7 с учетом реальных условий облачности, учитываемых коэффициентом η_0 , величина которого приведена в таблице 2.

$$\text{В апреле: } W_{M1} = 10^{-3}.30.4092.4.0,6.0,9 = 265 \text{ кВт-ч}$$

$$\text{В мае: } W_{M2} = 10^{-3}.31.4704.4.0,67.0,9 = 352 \text{ кВт-ч}$$

$$\text{В июне: } W_{M3} = 10^{-3}.30.4834.4.0,73.0,9 = 381 \text{ кВт-ч}$$

$$\text{В июле: } W_{M4} = 10^{-3}.31.4839.4.0,72.0,9 = 389 \text{ кВт-ч}$$

$$\text{В августе: } W_{M5} = 10^{-3}.31.4525.4.0,72.0,9 = 364 \text{ кВт-ч}$$

$$\text{В сентябре: } W_{M6} = 10^{-3}.30.3960.4.0,66.0,9 = 282 \text{ кВт-ч}$$

Итого за 6 теплых месяцев года может быть выработано 2033 кВт-ч/год тепловой энергии, что эквивалентно 1,75 Гкал/год. Удельная выработка тепловой энергии, отнесенная к одному квадратному метру солнечного коллектора составляет $2033/4 = 508 \text{ кВт-ч}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$, что соответствует $0,436 \text{ Гкал}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$.

Пример 2. Семья из шести человек решила установить в своем коттедже под Киевом (широта $\varphi = 50^\circ$) солнечную установку горячего водоснабжения, чтобы не расходовать газ в летнее время. Требуется предварительно определить потребность в основном оборудовании и оценить целесообразность этого решения.

Площадь F солнечных коллекторов для жилого дома предварительно определяется из расчета 1 – 1,5 м² на человека. Приняв среднее значение, получим $F = 1,25 \cdot 6 = 7,5$ м². Если принять 8 коллекторов площадью 1 м² каждый, то $F = 8$ м².

Емкость V бака-аккумулятора определяется из расчета 0,06 – 0,08 м³/м². Приняв меньшее значение, получим $V = 0,06 \cdot 8 = 0,48$ м³. Бака емкостью 500 л будет достаточно.

Циркуляционный насос первичного контура нужно подобрать по производительности G_1 , которую рассчитываем по формуле 10, в которой величина $(q' \eta_k)_{\text{MAX}}$ рассчитывается по формуле 11:

$$(q' \eta_k)_{\text{MAX}} = 1075 - 10,1 \cdot 50 = 570 \text{ Вт/м}^2$$

$c_1 = 3,61$ кДж/(кг·ч·°C), $\rho_1 = 1055$ кг/м³ (для 43%-ого раствора этиленгликоля), $T_1 = 55^\circ\text{C}$, $T_2 = 40^\circ\text{C}$.

$$G_1 = 3,6 \cdot 570 \cdot 8 / 3,61 \cdot 1055 (55 - 40) = 0,287 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Полагая, что гидравлическое сопротивление теплообменника по контуру греющей воды будет около 50 кПа, общая потеря давления в этом контуре предварительно оценивается величиной 80 кПа. Для этой цели подойдет, например, насос Wilo TOP-S 25/7 мощностью 0,2 кВт.

Циркуляционный насос вторичного контура подбирается по производительности G_2 , которую рассчитываем по формуле 12, в которой принимается $c_2 = 4,187$ кДж/(кг·ч·°C), $\rho_1 = 1000$ кг/м³ (для воды), $t_1 = 50^\circ\text{C}$, $t_2 = 35^\circ\text{C}$.

$$G_2 = 3,6 \cdot 570 \cdot 8 / 4,187 \cdot 1000 (50 - 35) = 0,261 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Если гидравлическое сопротивление теплообменника по контуру нагреваемой воды будет около 50 кПа, то общая потеря давления в этом контуре предварительно оценивается величиной 60 кПа. Подходящий насос – Wilo TOP-S 25/5 мощностью 0,09 кВт.

Исходными данными для подбора теплообменника будут расходы этиленгликоля $G_1 = 0,309$ м³/ч и воды $G_2 = 0,275$ м³/ч, температуры $T_1 = 55^\circ\text{C}$, $T_2 = 40^\circ\text{C}$, $t_1 = 50^\circ\text{C}$, $t_2 = 35^\circ\text{C}$, а также предельные потери давления 50 кПа в каждом из контуров. После подбора теплообменника, который обычно выполняется производителем по специальной программе, уточняются величины гидравлических потерь в каждом контуре, после чего уточняются параметры циркуляционных насосов.

Полученная предварительным расчетом информация достаточна для того, чтобы фирмы-поставщики оборудования предложили свои цены.

Цены могут быть разные, но скорее всего, такая солнечная установка будет стоить не менее 2,5 тыс. долларов.

Если ориентироваться на результаты расчетов, выполненных в примере 1, то с одного квадратного метра солнечного коллектора можно в течение теплых месяцев года получить 508 кВт-часов или 0,436 Гкал тепловой энергии. Такое же количество тепловой энергии, можно получить при сжигании 59 м^3 природного газа в котле с коэффициентом полезного действия 92%. С учетом площади солнечных коллекторов 8 м^2 , солнечная установка экономит $8 \cdot 59 = 472 \text{ м}^3$ газа в год. Экономия ежегодных затрат при стоимости газа 130 долларов за 1000 м^3 , составит не более $130 \cdot 0,472 = 61$ доллар. Разделив величину предполагаемых затрат на установку солнечной системы (2500 долларов) на величину экономии ежегодных затрат (61 доллар/год), получим срок окупаемости 41 год. Невыгодно.

Если бы альтернативой солнечной энергии была энергия электрическая, покупаемая по цене 0,2436 грн/кВт-ч, то удалось бы сэкономить $508 \cdot 8 \cdot 0,2436 = 990$ грн в год или 196 долларов. Срок окупаемости при этом составил бы $2500/196 = 12,7$ лет.

Несмотря на продолжительные сроки окупаемости солнечной установки, 2,5 тысячи долларов – цена невысокая по сравнению со стоимостью коттеджа, в котором солнечная водо-подогревательная установка могла бы стать украшением и предметом гордости семьи, заботящейся о своем престиже.

Тем более, что неосвязаемость такого понятия, как престиж, очень скоро может перерасти в ощутимую прибыль. Цены на энергоносители растут быстро.

Пример 3. 60-квартирный 5-этажный дом в Ялте обогревается зимой от котельной, которая летом не работает, и горячая вода в теплое время года в дом не подается. Предполагается установить на крыше дома солнечные коллекторы. Ориентация – юг. Угол наклона к горизонту 30° . Рассчитать необходимую площадь коллекторов и количество тепла, которое центральная солнечная установка горячего водоснабжения может выработать за теплый период года от апреля по сентябрь включительно.

Результаты расчета удельного теплового потока, отнесенного к одному квадратному метру солнечного коллектора, выполненного по заданным в примере условиям, приведены в таблице.

Расчетная таблица к примеру 3

час	H_B	H_D	q'	$\eta_k \eta_z$	q	H_B	H_D	q'	$\eta_k \eta_z$	q
	Вт/м ²	Вт/м ²	Вт/м ²		Вт/м ²	Вт/м ²	Вт/м ²	Вт/м ²		Вт/м ²
март						апрель				
6-7	35	35	104	0,50	53	111	70	157	0,52	82
7-8	185	63	341	0,50	172	258	90	359	0,52	188
8-9	335	67	549	0,50	277	404	11	468	0,52	245
9-10	454	105	748	0,50	378	557	125	778	0,52	407
10-11	540	111	870	0,50	439	633	132	887	0,52	465
11-12	628	119	1000	0,50	505	710	139	992	0,52	520
6-18					3647	Всего Вт-часов в сутки				3814
май						июнь				
6-7	202	77	207	0,56	116	236	77	216	0,58	126
7-8	341	94	400	0,56	225	380	90	406	0,58	236
8-9	480	111	595	0,56	334	522	105	599	0,58	348
9-10	649	118	809	0,56	455	655	118	778	0,58	452
10-11	713	125	906	0,56	509	730	118	878	0,58	510
11-12	780	132	996	0,56	560	808	118	971	0,58	564
6-18	Всего Вт-часов в сутки				4396	Всего Вт-часов в сутки				4469
июль						август				
6-7	181	84	194	0,61	118	125	70	160	0,60	96
7-8	348	102	400	0,61	242	278	90	363	0,60	217
8-9	507	111	603	0,61	365	432	111	578	0,60	346
9-10	619	125	763	0,61	462	537	118	724	0,60	434
10-11	716	131	892	0,61	540	637	122	857	0,60	514
11-12	758	132	948	0,61	574	717	125	960	0,60	576
6-18	Всего Вт-часов в сутки				4603	Всего Вт-часов в сутки				4366
сентябрь						октябрь				
6-7	70	42	117	0,57	67					
7-8	202	63	312	0,57	179	108	43	260	0,52	135
8-9	334	84	509	0,57	292	195	63	391	0,52	203
9-10	508	104	759	0,57	436	405	84	727	0,52	378
10-11	567	111	846	0,57	486	457	91	798	0,52	415
11-12	626	118	932	0,57	535	509	98	877	0,52	456
6-18	Всего Вт-часов в сутки				3989					3174

Данные H_B и H_D заносятся из таблицы 1 соответственно широте Ялты (44°).

Величина q' вычислена по формуле 1 при значениях углов $\varphi = 44^\circ$, $s = 30^\circ$, $\omega = 7,5^\circ$ в интервале времени 11-12 часов с увеличением на 15° для каждого предыдущего временного интервала.

Кид солнечного коллектора η_k вычислен по формуле 3 при температуре $t_k = 50^0$, а t_0 – по данным таблиц 2 и 2а для г. Ялты. Дом расположен в курортной зоне ($\eta_1 = 1$). Для центральной установки принято значение $\eta_2 = 0,9$. Значение в последней колонке получается перемножением значений предыдущих двух колонок.

Сумма величин по каждому часовому интервалу от 6 до 12 часов удваивается, и величина выработки тепловой энергии в безоблачный день выражена в Вт-часах/сут.

Анализируя результаты расчета, приходим к выводу, что меньше всего тепловой энергии вырабатывается в октябре – всего 3174 Вт-часа в сутки с каждого квадратного метра солнечного коллектора.

Суточная потребность жилого дома в горячей воде определяется по формуле 6. При этом предполагается, что в осредненной квартире проживает 3,5 человека, и общее количество жителей 60-квартирного дома составляет $3,5 \cdot 60 = 210$ человек.

$$Q = 1,163.85.210(55 - 15) = 830382 \text{ Вт-часа в сутки}$$

Необходимая площадь солнечного коллектора определяется по формуле 5. Коэффициент инвестора β в данном случае мог бы быть назначен равным 0,8, полагая, что в расчетном месяце октябре, когда интенсивность солнечного излучения наименьшая за восьмимесячный период, обеспеченность горячей водой в солнечный день 80% может считаться приемлемой.

$$F = 830382.0,8/3174 = 209 \text{ м}^2$$

Количество W_M , кВт-часов, выработанной в солнечном водоподогревателе тепловой энергии вычисляется отдельно для каждого месяца по формуле 7 с учетом реальных для Ялты условий облачности, учитываемых коэффициентом η_0 , величина которого приведена в таблицах 2 и 2а.

$$\begin{aligned} \text{В марте: } W_{M1} &= 10^{-3} \cdot 31.3647.209.0,51.0,9 = 10846 \text{ кВт-ч} \\ \text{В апреле: } W_{M2} &= 10^{-3} \cdot 30.3814.209.0,71.0,9 = 14762 \text{ кВт-ч} \\ \text{В мае: } W_{M3} &= 10^{-3} \cdot 31.4396.209.0,77.0,9 = 19102 \text{ кВт-ч} \\ \text{В июне: } W_{M4} &= 10^{-3} \cdot 30.4469.209.0,84.0,9 = 21184 \text{ кВт-ч} \\ \text{В июле: } W_{M5} &= 10^{-3} \cdot 31.4603.209.0,86.0,9 = 23084 \text{ кВт-ч} \\ \text{В августе: } W_{M6} &= 10^{-3} \cdot 31.4366.209.0,88.0,9 = 22406 \text{ кВт-ч} \\ \text{В сентябре: } W_{M7} &= 10^{-3} \cdot 30.3989.209.0,85.0,9 = 19135 \text{ кВт-ч} \\ \text{В октябре: } W_{M8} &= 10^{-3} \cdot 31.3174.209.0,6.0,9 = 11104 \text{ кВт-ч} \end{aligned}$$

Итого за 8 теплых месяцев года 141623 кВт-ч/год, что эквивалентно 122 Гкал/год. Удельная выработка тепловой энергии, отнесенная к одному квадратному метру солнечного коллектора составляет $141623/209 = 678$ кВт-ч/($\text{м}^2 \cdot \text{год}$), что соответствует 0,58 Гкал/($\text{м}^2 \cdot \text{год}$).

Литература:

1. Heizung und Klimatechnik 97/98 R. Oldenbourg Verlag. Munchen, Wien. 1997
2. НИИ строительной физики. Руководство по строительной климатологии. Стройиздат, Москва, 1977
3. Дж. А. Даффи, У.А. Бекман. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. Перевод с английского под. ред. Ю.Н. Малевского. Изд. «Мир», Москва, 1977
4. СНиП 2.01.01-82. Строительная климатология и геофизика, Стройиздат, Москва, 1983
5. СНиП 2.04.01-85. Внутренний водопровод и канализация зданий, Стройиздат, Москва, 1986
6. СНиП II-A.6-72. Строительная климатология и геофизика, Стройиздат, Москва, 1973
7. Установки солнечного горячего водоснабжения. ВСН 52-86/Госгражданстрой. Стройиздат, Москва, 1988

Особенности проектирования солнечных термосифонных систем

В некоторых случаях эксплуатация обычных систем солнечного горячего водоснабжения с двумя циркуляционными контурами, теплообменником и насосами может быть затруднена. Например, на летних базах отдыха, не охваченных сервисным обслуживанием поставщиков оборудования, или в местах, где часто отключается электроэнергия, более надежными источниками тепла будут такие установки, в которых вода движется при естественном побуждении.

Солнечные системы, работающие при естественном побуждении, называются термосифонными.

В термосифонных системах циркуляция теплоносителя обеспечивается воздействием гравитационных сил, возникающих в замкнутом контуре вследствие разности температуры воды, находящейся в разных местах контура. Под воздействием солнечного излучения вода, находящаяся внутри солнечного коллектора 1 (рис. 1.1), подогревается, ее плотность при этом уменьшается, и она устремляясь вверх, попадает в верхнюю часть бака накопителя 2. В этот же бак только в нижнюю его часть и с противоположной стороны подается холодная вода из водопровода В1. Как только потребитель горячей воды 3 откроет кран, накопившаяся в верхней части бака горячая вода начнет поступать в систему горячего водоснабжения.

Термосифонные системы имеют два преимущества перед обычными системами. Одно из них уже упоминалось – это полная независимость от системы электроснабжения и отсутствие затрат на электроэнергию. Второе преимущество заключается в том, что термосифонная система саморегулирующаяся. Циркуляция в системе начинается с первыми лучами солнца, падающими на плоскость солнечного коллектора. Чем интенсивнее солнечное излучение, тем больше становится сам собою расход воды. С заходом солнца циркуляция прекращается. Такой оптимальной причинно-следственной синхронизации можно добиться лишь с помощью самых совершенных систем автоматики.

В то же время, температура воды, выдаваемой термосифонной системой, не может поддерживаться на постоянном уровне, и в этом смысле, ее эксплуатационные характеристики уступают характеристикам солнечных систем, оборудованных циркуляционными насосами и электронной автоматикой.

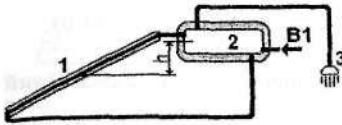


Рис 1.1 Схема солнечной термосифонной системы

- 1 – солнечный коллектор,
2 – бак-накопитель,
3 – потребители горячей воды

воды t . При пользовании Excel эти значения удобно вводить аналитически. Для этого получена зависимость плотности от температуры:

$$\rho = -0,003t^2 - 0,1511t + 1003,1 \quad (1.2)$$

С учетом этой зависимости величина естественного давления может быть выражена через разность температур Δt воды в подающем и обратном трубопроводах солнечного коллектора

$$H_e = 9,81h (0,1511\Delta t + 0,003\Delta t^2) \quad (1.3)$$

Гидравлическое сопротивление ΔP , Па, контура естественной циркуляции выражается зависимостью

$$\Delta P = SG^2, \quad (1.4)$$

где S – характеристика сопротивления, Па/(т/ч)² контура;
 G – расход, м³/ч, воды в контуре.

$$G = 3,6(q'_{\eta_k})_{\max} F / (cp\Delta t), \quad (1.5)$$

где $(q'_{\eta_k})_{\max}$ – удельный тепловой поток, Вт/м², солнечного излучения, отводимый с поверхности коллектора в максимальный для этой поверхности час. Величина $(q'_{\eta_k})_{\max}$ определяется по формуле 11;
 F – площадь, м², солнечных коллекторов, которую определяют по формуле 5;
 c – теплоемкость воды, равная 4,187 кДж/(кг.ч.⁰С);
 ρ – объемная масса, кг/м³, воды, величину которой для такого рода расчетов принимают равной 1000.

Исходя из неперменного равенства $H_e = \Delta P$, получаем уравнение

Величина естественного давления H_e , Па, определяется по формуле, учитывающей превышение приемника тепловой энергии h , м, (рис. 1.1) над источником тепла.

$$H_e = 9,81h(\rho_2 - \rho_1), \quad (1.1)$$

где ρ_2 и ρ_1 – плотность воды, кг/м³, в обратном и подающем трубопроводах. Обычно значения ρ принимают по таблицам в зависимости от температуры

воды t . При пользовании Excel эти значения удобно вводить аналитически. Для этого получена зависимость плотности от температуры:

$$9,81h(0,1511\Delta t + 0,003\Delta t^2) = S [3,6(q'\eta_k)_{\max} F / (cp\Delta t)]^2, \quad (1.6)$$

которое после подстановки постоянных величин и преобразований приводится к виду:

$$S = 3169 \frac{h(0,1511\Delta t^3 + 0,003\Delta t^4)}{(q'\eta_k)_{\max}^2 F^2} \quad (1.7)$$

Контур естественной циркуляции должен быть сконструирован таким образом, чтобы его характеристика сопротивления не превышала значения S , вычисленного по формуле 1.7. При этом разность температур Δt в контуре при максимальных нагрузках принимают в интервале 5...10К.

Пример расчета.

Подобрать диаметр трубопровода контура циркуляции солнечной термосифонной системы горячего водоснабжения базы отдыха в Херсонской области (географическая широта местности $\varphi = 46^\circ$), включающей в себя солнечный водоподогреватель площадью $F = 24 \text{ м}^2$, ориентированный к югу и установленный под углом 30° к горизонту. Разность отметок центров нагревания и охлаждения воды $h = 1,2 \text{ м}$, а разность температур Δt в контуре при максимальных нагрузках принята 7К.

Характеристика сопротивления контура естественной циркуляции не должна превышать величины S , определяемой по формуле 1.7. Предварительно по формуле 11 необходимо вычислить величину $(q'\eta_k)_{\max}$:

$$(q'\eta_k)_{\max} = 1075 - 10,146 = 610 \text{ Вт}$$

$$S = 3169 \frac{1,2(0,1511 \cdot 7^3 + 0,003 \cdot 7^4)}{610^2 \cdot 24^2} = 0,001047 \text{ Па}/(\text{т/ч})^2 = 1,047 \text{ кПа}/(\text{т/ч})^2$$

Рассмотрим, удовлетворяет ли этому требованию солнечный водоподогреватель, составленный из 24 солнечных коллекторов площадью 1 м^2 каждый, собранных так, как показано на рисунке 1.2, если известно, что коэффициент местного сопротивления одного солнечного коллектора согласно паспортным данным $\xi = 2,0$ при диаметре подводки Ду20.

Определим характеристику сопротивления S одного солнечного коллектора

$$S = A\xi,$$

где A – удельное динамическое давление, $\text{Па}/(\text{кг/ч})^2$. Согласно справочным данным, для трубы Ду20 $A = 3,19 \cdot 10^{-4} \text{ Па}/(\text{кг/ч})^2$

$$S = 3,19 \cdot 10^{-4} \cdot 2,0 = 6,38 \cdot 10^{-4} \text{ Па}/(\text{кг/ч})^2$$

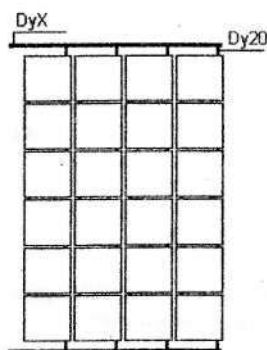


Рис. 1.2 Схема обвязки солнечных коллекторов (к примеру расчета)

Характеристика сопротивления S_6 ветви из шести последовательно соединенных солнечных коллекторов:

$$S_6 = 6.6,38 \cdot 10^{-4} = 38,28 \text{ Па}/(\text{кг}/\text{ч})^2$$

Характеристика сопротивления S_{12} двух параллельных ветвей, каждая из которых включает в себя 6 последовательно соединенных солнечных коллекторов:

$$S_{12} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{S_6}} + \frac{1}{\sqrt{S_6}}\right)^2} = \frac{1}{\left(\frac{100}{\sqrt{38,28}} + \frac{100}{\sqrt{38,28}}\right)^2} = 9,57 \cdot 10^{-4}$$

Характеристика сопротивления S_{24} четырех параллельных ветвей, каждая из которых включает в себя 6 последовательно соединенных солнечных коллекторов:

$$S_{24} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{S_{12}}} + \frac{1}{\sqrt{S_{12}}} + \frac{1}{\sqrt{S_{12}}} + \frac{1}{\sqrt{S_{12}}}\right)^2} = \frac{1}{\left(\frac{100}{\sqrt{9,57}} + \frac{100}{\sqrt{9,57}} + \frac{100}{\sqrt{9,57}} + \frac{100}{\sqrt{9,57}}\right)^2} = 2,39 \cdot 10^{-4} \text{ Па}/(\text{кг}/\text{ч})^2 = 2,39 \text{ кПа}/(\text{т}/\text{ч})^2$$

Таким образом, характеристика сопротивления солнечного водоподогревателя, изображенного на рис. 1.2, превышает рассчитанную в самом начале решения этого примера предельную для циркуляционного контура величину $S = 1,047 \text{ кПа}/(\text{т}/\text{ч})^2$. Поэтому нет нужды рассчитывать диаметр сборного трубопровода DyX , а нужно переконструировать водоподогреватель (рис. 1.3).

Произведем теперь новый расчет по измененной схеме:

Характеристика сопротивления S_4 ветви из 4-х последовательно соединенных солнечных коллекторов:

$$S_4 = 4.6,38 \cdot 10^{-4} = 25,52 \text{ Па}/(\text{кг}/\text{ч})^2$$

Характеристика сопротивления S_8 двух параллельных ветвей, каждая из которых включает в себя 4 последовательно соединенных солнечных коллектора:

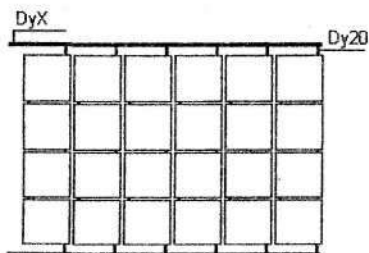


Рис. 1.3 Измененная схема обвязки солнечных коллекторов (к примеру расчета)

$$S_8 = \frac{1}{\left(\frac{100}{\sqrt{25,52}} + \frac{100}{\sqrt{25,52}}\right)^2} = 6,38 \cdot 10^{-4} \text{ Па}/(\text{кг}/\text{ч})^2$$

Характеристика сопротивления S_{16} четырех параллельных ветвей, каждая из которых включает в себя 4 последовательно соединенных солнечных коллектора:

$$S_{16} = \frac{1}{\left(\frac{100}{\sqrt{6,38}} + \frac{100}{\sqrt{6,38}}\right)^2} = 1,59 \cdot 10^{-4} \text{ Па}/(\text{кг}/\text{ч})^2$$

Характеристика сопротивления S_{24} двух параллельных ветвей, одна из которых включает в себя 16, а другая – 8 солнечных коллекторов:

$$S_{24} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{S_{16}}} + \frac{1}{\sqrt{S_8}}\right)^2} = \frac{1}{\left(\frac{100}{\sqrt{1,59}} + \frac{100}{\sqrt{6,38}}\right)^2} = 0,707 \cdot 10^{-4} \text{ Па}/(\text{кг}/\text{ч})^2 = 0,707 \text{ кПа}/(\text{т}/\text{ч})^2$$

Эта величина не превышает заданного значения ($0,707 < 1,047$). Имеющийся запас естественного давления может быть использован на преодоление трения в сборных трубопроводах циркуляционного контура, диаметр которых обозначен на схемах ДуХ.

Характеристика сопротивления $S_{\text{ТР}}$ сборных участков:

$$S_{\text{ТР}} = 1,047 - 0,707 = 0,34 \text{ кПа}/(\text{т}/\text{ч})^2$$

Если длина сборных трубопроводов 20 метров, то характеристика сопротивления $S_{\text{ТР.уд}}$ одного метра трубы:

$$S_{\text{ТР.уд}} = 0,5 \cdot 0,34 / 20 = 0,0085 \text{ кПа}/(\text{т}/\text{ч})^2,$$

где 0,5 – коэффициент, ориентировочно учитывающий долю местных сопротивлений.

Обратившись к справочным данным*, находим, что наиболее близким к рассчитанной величине значением удельной характеристики сопротивления обладает труба Ду50.

* Характеристики гидравлического сопротивления трубопроводов и местных сопротивлений приведены, например, в брошюре «Пособие по проектированию систем водяного отопления к СНиП 2.04.05-91 «Отопление, вентиляция и кондиционирование». Изд. КиевЗНИИЭП, 2001