

6
A-2

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. Г. М. КРЖИЖАНОВСКОГО

Академии наук СССР

На правах рукописи

Аспирант Д. М. ЩЕГОЛЕВ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ОТОПЛЕНИЯ ПОМЕЩЕНИЙ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель доктор
технических наук, профессор
В. А. БАУМ.

Москва — 1954

Использование солнечной энергии для нужд отопления помещений дает возможность значительной экономии топлива в южных районах нашей страны. Особенностью солнечной радиации является ее неравномерность как в течение года, так и в течение суток. Кроме периодической закономерной неравномерности солнечная радиация имеет еще и случайную неравномерность в связи с облачностью. Неравномерность солнечной радиации при использовании последней для отопительных нужд может быть выровнена за счет теплового аккумуляирования. Решение теплового аккумуляирования — основная задача исследований диссертанта.

Тепловое аккумуляирование.

Для выравнивания суточной неравномерности солнечной радиации, используемой для отопительных целей, могут служить теплоемкие отопительные системы и конструкции самого здания. Аккумуляирование тепла конструкциями, подверженными периодическим нагреваниям и охлаждением, определяется известными уравнениями теории тепловых волн. При необходимости аккумуляированного теплового запаса на более продолжительный срок, тепловой аккумулятор приобретает значительные размеры и выносится за пределы отапливаемого здания. Теплоаккумуляующей средой может быть твердое вещество и жидкость. Одним из наилучших твердых теплоаккумуляующих веществ является грунт, из жидких — вода.

Тепловое аккумуляирование грунтом.

Тепловой аккумулятор этого типа осуществим путем прокладки на определенной глубине в грунте теплообменного устройства. Аккумуляирование тепла ведется как вниз полуограниченным этим устройством массивом, так и вверх слоем грунта, ограниченным с одной стороны поверхностью теплообменного устройства, а с другой стороны естественной поверхностью грунта. Исследования, проведенные автором, показали что распределение температуры в слое грунта, ограниченном рабочей поверхностью аккумулятора (поверхностью теплообменного устройства) и естественной поверхностью грунта, отвечает известной закономерности распределения температуры в плоской стенке с одинаковым периодическим изменением температуры на поверхностях лишь в частных случаях задания крайних условий изменения температуры на рабочей поверхности аккумулятора.

72461

тора и естественной поверхности грунта. Эти частные случаи сводятся к симметричному распространению тепловых волн относительно центральной плоскости стенки. Для распределения температуры в плоской стенке при общем случае задания краевых условий на ее поверхностях (лишь бы они имели периодический характер) диссертантом предложено уравнение:

$$\begin{aligned} & k = \frac{2,5\sqrt{az}}{S} \\ \vartheta_{x,\tau} = & \sum_{k=0} \left(\frac{-1^k+1}{2} \right) A e^{-\sqrt{\frac{\pi}{az}}(sk+x)} \cos \left[2\pi \frac{\tau}{z} + \alpha - \sqrt{\frac{\pi}{az}}(sk+x) \right] - \\ & k = \frac{2,6\sqrt{az}}{S} \\ & - \sum_{k=0} \left(\frac{1^k-1}{-2} \right) B e^{-\sqrt{\frac{\pi}{az}}(sk+x)} \cos \left[2\pi \frac{\tau}{z} + \beta - \sqrt{\frac{\pi}{az}}(sk+x) \right] + \\ & k = \frac{2,6\sqrt{az}}{S} \\ & + \sum_{k=0} \left(\frac{-1^k+1}{2} \right) B e^{-\sqrt{\frac{\pi}{az}}(sk+s-x)} \cos \left[2\pi \frac{\tau}{z} + \beta - \sqrt{\frac{\pi}{az}}(sk+s-x) \right] - \\ & k = \frac{2,6\sqrt{az}}{S} \\ & - \sum_{k=0} \left(\frac{-1^k-1}{-2} \right) A e^{-\sqrt{\frac{\pi}{az}}(sk+s-x)} \cos \left[2\pi \frac{\tau}{z} + \alpha - \sqrt{\frac{\pi}{az}}(sk+s-x) \right]; \end{aligned}$$

или введя принятое для плоской стенки обозначение

$$v = \frac{S}{2} \sqrt{\frac{\pi}{az}}$$

$$\begin{aligned} & k = \frac{2,3}{v} \\ \vartheta_{x,\tau} = & \sum_{k=0} \left(\frac{-1^k+1}{2} \right) A e^{-\frac{2v}{S}(sk+x)} \cos \left[2\pi \frac{\tau}{z} + \alpha - \frac{2v}{S}(sk+x) \right] - \\ & k = \frac{2,3}{v} \\ & - \sum_{k=0} \left(\frac{-1^k-1}{-2} \right) B e^{-\frac{2v}{S}(sk+x)} \cos \left[2\pi \frac{\tau}{z} + \beta - \frac{2v}{S}(sk+x) \right] + \\ & k = \frac{2,3}{v} \\ & + \sum_{k=0} \left(\frac{-1^k+1}{2} \right) B e^{-\frac{2v}{S}(sk+s-x)} \cos \left[2\pi \frac{\tau}{z} + \beta - \frac{2v}{S}(sk+s-x) \right] - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & k = \frac{2,3}{v} \\ & - \sum_{k=0} \left(\frac{-1^k-1}{-2} \right) A e^{-\frac{2v}{S}(sk+s-x)} \cos \left[2\pi \frac{\tau}{z} + \alpha - \frac{2v}{S}(sk+s-x) \right]; \end{aligned} \dots (1)$$

Число членов ряда $k = \frac{2,3}{v}$ определяется из принятого в теории тепловых волн понятия заметного проникновения волны.

В этом случае были заданы распределения температуры на поверхностях

$$\vartheta_{\tau,FI} = A \cos(2\pi \frac{\tau}{z} + \alpha)$$

$$\vartheta_{\tau,FI} = B \cos(2\pi \frac{\tau}{z} + \beta)$$

Для толстых стен уравнение (1) превращается в известное уравнение распределения температуры в полуограниченном массиве.

При $A=B$ и $\alpha=\beta$ решение уравнения (1) в пределах точности вычисления совпадает с решением распределения температуры для стенки с одинаковым изменением температуры на поверхностях. Кроме того, уравнение (1) дает совпадение в пределах точности измерений с проведенным диссертантом экспериментальным распределением температуры в стене с различными и сложными изменениями температуры на поверхностях, а именно

$$\begin{aligned} \vartheta_{\tau,FI} = & 8,75 \cdot \cos(2\pi \frac{\tau}{z} + 133) + 3,58 \cdot \cos(4\pi \frac{\tau}{z} - 27) + 2,29 \cos(6\pi \frac{\tau}{z} + \\ & + 171) + 1,08 \cdot \cos(8\pi \frac{\tau}{z} + 5) + 0,51 \cdot \cos(10\pi \frac{\tau}{z} + 173); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \vartheta_{\tau,FI} = & 2,34 \cdot \cos(2\pi \frac{\tau}{z} + 116) + 0,86 \cdot \cos(4\pi \frac{\tau}{z} - 36) + 0,225 \cdot \cos(6\pi \frac{\tau}{z} + \\ & + 87,5) + 0,256 \cdot \cos(8\pi \frac{\tau}{z} + 159) + 0,254 \cdot \cos(10\pi \frac{\tau}{z} - 39); \end{aligned}$$

По имеющемуся распределению температуры в стене обычными методами находятся удельные тепловые потоки на поверхностях и количество аккумулированного массивом этой стены тепла.

Расчеты, проведенные диссертантом, показывают, что твердый тепловой аккумулятор бесконечно больших размеров, использующий в качестве аккумулирующего вещества грунт с

физическим константами $\lambda = 2,0 \frac{\text{ккал}}{\text{м час гр.}}$

$a = 0,526 \cdot 10^{-2} \frac{\text{м}^2}{\text{час}}$ и с глубиной заложения теплообменного устройства 7 м дает возможность аккумулировать при годовом периоде изменения температуры $Q = 48300 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2}$

при КПД $\eta = 29\%$. Расчеты проведены для района г. Ашхабада. Расчетный период имеет перед собой бесконечное число лет работы теплового аккумулятора. Для тех же условий работы теплового аккумулятора, но в грунте малой влажности с физическими константами $\lambda = 0,5 \frac{\text{ккал}}{\text{м час гр.}}$

$a = 0,150 \cdot 10^{-2} \frac{\text{м}^2}{\text{час}}$ аккумулированное тепло со-

ставляет $Q = 27.680 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2}$ при $\eta = 40\%$. Тепловой режим аккумулятора и в том и в другом случае учитывает накопление тепла только в летний период. Увеличением объема теплоносителя в теплообменном устройстве можно перейти к аккумулятору, в котором основная часть тепла аккумулируется теплоносителем — водой.

Водяной аккумулятор тепла.

Водяной аккумулятор тепла при тех же условиях, которые были приняты для твердого аккумулятора дает возможность аккумулировать, в зависимости от физических констант окружающего бассейн грунта, соответственно

$$Q = 148.200 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2} \text{ при КПД } \eta = 26\% \text{ и}$$

$$Q = 209.000 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2} \text{ при КПД } \eta = 60\%. \text{ Рассматриваемый}$$

водяной аккумулятор тепла представляет собой бассейн перекрытый сверху. Глубина заложения дна бассейна $H = 7$ м., толщина слоя воды $h = 5$ м. Расхождение показателей водяного и грунтового аккумуляторов еще больше увеличивается с применением тепловой изоляции. В то же время, при переходе с конечным размерам аккумулятора, растечение тепла в стороны будет тем меньше, чем меньше коэффициент теплопроводности массива и кроме того применение тепловой изоляции уменьшает абсолютное значение тепловых потоков, направленных вглубь массива, чем уменьшаются непроизводительные затраты тепла на его нагрев, которые особенно существенно сказываются в

первые годы работы теплового аккумулятора. Все это делает нецелесообразным применение хотя и более простого в изготовлении твердого аккумулятора, основанного на принципе аккумуляции тепла массивом, подверженным периодическому изменению температуры на его поверхности. Рациональным является аккумулярование тепла в теплоизолированном пространстве, заполненном аккумулирующим веществом в жидком (водяной аккумулятор тепла) или твердом состоянии (химический аккумулятор тепла).

Отопительные установки с водяным аккумулятором тепла.

Накопление тепла аккумулятором может производиться по одной из следующих схем, либо сочетания этих схем, а именно:

1. Накопление тепла аккумулятором производится только в летний период. Эта схема имеет ввиду возможность применения для нагрева аккумулирующей среды наряду с высокотемпературными гелиоприемниками, снабженными концентрирующими лучистую энергию солнца отражателями также и низкотемпературные гелиоприемники без концентрации лучистой энергии — «горячие ящики».

2. Накопление тепла производится круглосуточно. Эта схема предусматривает нагрев аккумулирующей среды лишь высокотемпературными гелиоприемниками, ибо солнечные водонагреватели типа «горячих ящиков» в зимнее время, нагревая воду до $50-60^\circ\text{C}$ работают с чрезвычайно низким коэффициентом полезного действия.

3. Накопление тепла аккумулятором производится в осенне-зимний период.

В этом случае в отличие от предыдущих гелиоаппаратура используется для отопительных целей в неблагоприятный для нее, для большинства районов наиболее облачный период года, давая возможность использовать гелиоаппаратуру в летнее время для сезонных потребителей, как: производство льда, охлаждение камер для хранения скоропортящихся продуктов, охлаждение помещений, опреснение соленой воды и т. д., т. е. в этом случае предусматривается комплексное использование солнечной энергии.

В таблице I—II представлены данные расчета основных узлов солнечного отопления с водяным аккумулярованием тепла для рабочего поселка на 500 и 5000 человек, расположенного в районе г. Ашхабада. (Величины необходимых поверхностей гелиоприемников взяты из условия применения во всех случаях гелиоприемников с параболоидными отражателями).

Рабочий поселок на 500 человек.

Таблица I.

Схема накопления тепла аккумулятора	Накопление тепла производится с 1/V по 1/XI, после чего гелиоприменники консервируются.					Накопление тепла производится с 1/V до конца отопительного сезона					Накопление тепла производится в осенне-зимний период с тем, чтобы к началу отопительного сезона был 1 месячный запас					
	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5
Толщина водяного слоя (м)																
Наличие слоя шлаковой изоляции $\delta = 1$ м под днищем, за боковыми стенками, над перекрытием бассейна-аккумулятора.	нет	нет	есть	есть	нет	нет	есть	есть	нет	нет	есть	есть	нет	нет	есть	есть
Линейный размер квадратного в основании бассейна-аккумулятора (м)	190	36	52	27	52	27	40	24	40	20	29	17				
Объем аккумулирующей воды (м ³)	72000	6500	5400	3700	5400	3700	3200	2900	3200	2000	1680	1450				
Потребное тепло для нагрева аккумулирующей воды (мгкал)	8247	603	452	267	810	408	310	240	485	290	219	185				
Коэффициент полезного действия отопительной установки (%)	1,8	24,7	33,0	55,8	18,4	36,5	48,0	62,0	30,8	51,4	68,0	80,5				
Необходимая поверхность гелиоприменников (м ²)	11000	850	640	380	930	470	355	275	2240	1380	1170	1040				
Дата перевода гелиоприменников на работу по зарядке теплового аккумулятора													$\frac{12}{x}$	$\frac{15}{x}$	$\frac{26}{x}$	$\frac{29}{x}$

Таблица II.

Рабочий поселок на 5000 человек.

Схема накопления тепла аккумулятора	Накопление тепла производится с 1/V по 1/XI, после чего гелиоприменники консервируются					Накопление тепла производится с 1/V до конца отопительного сезона					Накопление тепла производится в осенне-зимний период с тем, чтобы к началу отопительного сезона был 1 месячный запас					
	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5
Толщина водяного слоя (м)																
Наличие слоя шлаковой изоляции $\delta = 1$ м под днищем, за боковыми стенками, над перекрытием бассейна-аккумулятора.	нет	нет	есть	есть	нет	нет	есть	есть	нет	нет	есть	есть	нет	нет	есть	есть
Линейный размер квадратного в основании бассейна-аккумулятора (м)	400	102	163	83	152	81	124	75	112	59	91	54				
Объем аккумулирующей воды (м ³)	320000	52000	53000	34500	46000	33000	30800	28000	25200	17500	17100	14500				
Потребное тепло для нагрева аккумулирующей воды (мгкал)	35810	4500	4395	2496	6320	3350	2930	2290	3627	2320	2140	1825				
Коэффициент полезного действия отопительной установки (%)	4,2	33,0	34,0	60,0	23,6	44,5	51,0	65,0	41,0	64,4	70,0	81,7				
Необходимая поверхность гелиоприменников (м ²)	50500	6350	6200	3500	7250	3840	3350	2620	17600	12100	11400	10200				
Дата перевода гелиоприменников на работу по зарядке теплового аккумулятора													$\frac{17}{x}$	$\frac{24}{x}$	$\frac{26}{x}$	$\frac{29}{x}$

Передача тепла отапливаемым помещениям может быть осуществлена как путем устройства в бассейне-аккумуляторе теплообменного устройства, так и путем подачи в отопительные системы непосредственно аккумулирующей воды. Отопительные системы в зданиях, отапливаемых предлагаемым способом, отличаются от обычных систем водяного отопления лишь величиной поверхностей нагревательных приборов, которая при радиаторных системах отопления, для расширения пределов охлаждения теплового аккумулятора увеличивается на 100%, а при потолочной системе лучистого отопления на 20—25%. Предпочтение следует отдать потолочной системе лучистого отопления также и потому, что эта система хорошо сочетается в себе наряду с отоплением также и возможность летнего охлаждения помещений.

На основе сравнения приведенных в таблицах I и II данных по каждой из вышеуказанных схем накопления тепла аккумулятором следует сделать вывод, что накопление тепла только в летний период нецелесообразно. При сравнении двух последних схем следует иметь в виду, что накопление тепла аккумулятором в осенне-зимний период дает возможность комплексного использования гелиопаратуры, что дает значительное преимущество этой схеме.

Наличие сезонных — летних потребителей дает также возможность использования гелиопаратуры в течение отопительного сезона как дублирующего устройства к топливному отоплению. Это может дать экономию топлива в зависимости от климатических условий того или иного района Средней Азии от 10 до 15%.

Применение аккумуляционной схемы солнечного отопления делает неизбежным тепловые потери бассейном аккумулятором, из которых основная часть приходится на перекрытие бассейна, поэтому температура поверхности грунтовой засыпки аккумулятора будет превышать температуру естественной поверхности грунта. Последнее дает возможность использования «утепленного грунта» для выращивания ранних овощей и рассады. Искусственное утепление грунта для этих целей путем прокладки в грунте сети паропроводов в последние годы начинает находить широкое распространение.

Диссертантом проведено экономическое сравнение с обычным отоплением от групповой котельной отопления с использованием солнечной энергии: 1) солнечное отопление как дублирующее котельную, 2) солнечное отопление с тепловым аккумулярованием как самостоятельная отопительная схема.

Сравнение проведено для рабочего поселка на 500 и 5000 человек, расположенного в районе г. Ашхабада. Для сравнения принят тепловой аккумулятор-бассейн с толщиной слоя воды в 5 метров, без применения тепловой изоляции. Результаты сравнения проведены в таблице III.

Таблица III.

Вариант	Отопление поселка на	Головные затраты в руб.						Экономия топлива (тонн)
		По котельной включая стоимость топлива	По домовым системам отопления	По наружным сетям	По гелиопаратуре (на емкостях) данного периода (в среднем)	По тепловою аккумулятору	Экономия за счет летнего охлаждения	
Отопление от котельной	500 чел. 5000 чел.	38.600 328.600	4553 44480	5300 39600	— —	— —	— —	48453 412680
Отопление от котельной с гелиодублиром	500 чел. 5000 чел.	35900 301000	4553 44480	5300 39600	4770 47700	— —	— —	50523 432780
Отопление от гелиоустановок с применением теплового аккумулярования	500 чел. 5000 чел.	— —	6204 58964	5300 39600	28600 251000	21600 189000	—15200 —132000	46504 407564

Проведенное сравнение показывает, что в отопительных установках по этим схемам себестоимости единицы тепла примерно одинаковы. Однако при использовании солнечной энергии для отопительных целей капитальные затраты значительно превышают затраты при топливном отоплении и окупаются за счет экономии топлива в длительные сроки, но возможность разгрузки транспорта, подвозящего топливо и повышение санитарно-гигиенических условий отапливаемых населенных пунктов вполне оправдывает дополнительные капиталовложения. Кроме того, следует отметить, что себестоимость единицы продукции сезонных — летних гелиопотребителей при комплексном использовании гелиоприемников будет значительно ниже, чем без использования гелиоприемников в зимнее время.

Испытания солнечной отопительной установки.

Солнечная отопительная установка, рассчитанная и спроектированная диссертантом, была построена в 1952 г. Энергетическим институтом АН СССР на экспериментальной базе в г. Ташкенте для отопления лабораторного здания. Установка включает в себя три основных узла: гелиоприемник, тепловой аккумулятор и отопительную систему. Отопительная система представляет собой обычную систему с естественной циркуляцией и верхней разводкой, в которой котел заменен теплообменником, расположенным в резервуаре аккумулятора. В качестве генератора тепла использована имеющаяся на площадке экспериментальной базы гелиоустановка с параболическим отражателем

Ø 10 м. Расчетная производительность гелиокотла $33.000 \frac{\text{ккал}}{\text{час}}$

Тепловой аккумулятор представляет собой резервуар Ø 2,95 м l = 9,3 м от железнодорожной цистерны емкостью 63 м³, зарытый в землю в непосредственной близости от здания.

Цель проведенных испытаний: 1) определение коэффициента полезного действия отопительного устройства, 2) выявление работы отдельных узлов установки.

Работы по монтажу отопительной установки были закончены в декабре 1952 г. Конструктивный недостаток механизма вращения гелиоустановки делает невозможным ее работу с конца ноября по конец января. Поэтому как первоначальный нагрев, так и последующие подогревы аккумулирующей воды пришлось производить паром, подведенным из котельной.

В периоды между подводом пара к тепловому аккумулятору коэффициент полезного действия отопительного устройства:

I с 3/I по 14/I 1953 г.	КПД $\eta = 36\%$
II с 17/I по 26/I 1953 г.	КПД $\eta = 45\%$
III с 29/I по 9/II 1953 г.	КПД $\eta = 57\%$

Эти периоды охлаждения аккумулятора протекали из-за ограниченной подачи пара в различных интервалах температуры аккумулирующей воды.

Столь резкое изменение коэффициента полезного действия отопительной установки объясняется резким изменением коэффициента теплопроводности грунта: 1) $\lambda = 1,2 \frac{\text{ккал}}{\text{м час гр}}$

II) $\lambda = 0,8 \frac{\text{ккал}}{\text{м час гр}}$ III) $\lambda = 0,6 \frac{\text{ккал}}{\text{м час гр}}$

Изменение коэффициентов теплопроводности грунта, окружающего резервуар-аккумулятор объясняется в свою очередь: 1) таянием в первый момент комьев мерзлой земли, 2) изменением, по ходу прогрева грунта, его влажности.

Распространив данные III периода охлаждения теплового аккумулятора на весь температурный интервал аккумулярования получаем КПД $\eta = 51\%$ и срок работы аккумулятора $p = 15$ суток при средней температуре в отапливаемом помещении $t_{\text{пом}}^{\text{ср}} = 21,3^\circ\text{C}$, или $\eta = 40\%$, $p = 18,5$ суток при $t_{\text{пом}}^{\text{ср}} = 15^\circ\text{C}$. Испытаниями также установлены конкретные меры обеспечения возможности использования установки солнечного отопления в течение всего отопительного сезона.

Выводы.

1. Применение твердых тепловых аккумуляторов солнечного тепла, предназначенных для целей отопления зданий, возможно, но не целесообразно, ибо они значительно уступают водяным аккумуляторам в: а) размерах, б) коэффициентах полезного действия, в) простоте теплообменных устройств для передачи тепла гелиоприемниками аккумулятору и аккумулятором отопительным системам, г) простоте ремонта теплового аккумулятора, д) простоте регулировки нагрузок отопительных систем.

2. Применение теплового насоса для расширения температурных пределов аккумулярования нецелесообразно из-за: а) значительного и неравномерного расходования электро или какого-либо другого вида энергии, б) сложности устройств и наличия большого количества теплообменных аппаратов.

3. Наиболее целесообразным является аккумулярование тепла водой в подземных бассейнах — аккумуляторах.

4. Наилучшей схемой солнечного отопления является комплексное использование гелиоустановок летом для сезонных нужд: опреснение соленой воды, получение льда, охлаждение помещений и т. д.; и в осенне-зимний период для отопления помещений.

5. В качестве гелиоприемника при комплексном использовании солнечных установок могут быть использованы только приемники с концентрацией энергии.

6. В южных районах нашей страны, особенно в пустынных условиях, солнечное отопление в настоящий момент может быть рекомендовано при комплексном использовании гелиоустановок по следующим двум схемам:

а) В имеющихся населенных пунктах с централизованным отоплением, путем дублирования котельных в ясные дни гелиоприемниками, что может дать экономию топлива, например для района г. Ашхабада в 13%, без удорожания себестоимости единицы тепла.

б) Во вновь строящихся и населенных пунктах, не имеющих централизованного отопления, путем устройства аккумуляторной солнечной отопительной установки, что при 100% экономии топлива, также не дает удорожания себестоимости единицы тепла.

72461

