



УДК 504.064.2:658.26

О.И. ГОРБАТЫХ, аспирант, **В.В. МАКАРОВ**, канд. техн. наук, доцент

Севастопольский национальный технический университет (СевНТУ), г. Севастополь

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Рассмотрены вопросы применения систем горячего водоснабжения на основе использования солнечной энергии. Выполнен анализ целесообразности и эффективности их применения, сделана оценка количества замещаемого топлива с 1 м² гелиополя для серийных солнечных коллекторов применительно к климатическим условиям Севастопольского района Крыма.

Ключевые слова: гелиоустановка, горячее водоснабжение, солнечный коллектор, коэффициент полезного действия.

В настоящее время в Украине для обеспечения теплоснабжения жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ) ежегодно сжигается около 74 млн т условного топлива, из которых 14 млн т идет на горячее водоснабжение (ГВС).

Структура потребления первичных энергоресурсов при обеспечении ГВС ЖКХ выглядит следующим образом: уголь – 9,82 млн т, газ – 5,08 млн т и мазут –

1,02 млн т. Ежегодное количество выбросов основных загрязняющих веществ и парниковых газов, поступающих в атмосферный воздух при таком потреблении топлива, представлено в табл. 1.

При расчете выбросов загрязняющих веществ в атмосферу принимался элементный состав топлива в соответствии с [1].

Таблица 1 – Валовые выбросы загрязняющих веществ, т

Выброс	Уголь	Мазут	Природный газ	Всего
SO ₂	4497,56	47,357	0	4544,917
NO _x	90,511	3,657	34,859	129,027
CO	26,838	1,695	11,156	39,689
CO ₂	2072020	3,098 · 10 ⁻³	13644,88	2085664,883
Твердые частицы	30,825	0,023	0	30,848
Pb	0,013	0	0	0,013
Hg	0,887 · 10 ⁻³	0	0,065 · 10 ⁻³	0,952 · 10 ⁻³
Cr	5,989 · 10 ⁻³	0	0	5,989 · 10 ⁻³
Ni	9,539 · 10 ⁻³	0	0	9,539 · 10 ⁻³
Cu	9,761 · 10 ⁻³	0	0	9,761 · 10 ⁻³
Zn	38,602	0	0	38,602
As	0,017	0	0	0,017
V ₂ O ₅	0	0,039	0	0,039
N ₂ O	0,314	0,024	0,066	0,404
CH ₄	0,226	0,12	0,234	0,580
Расход топлива, млн т	9,82	1,02	5,08	15,92

Одним из путей решения проблемы по уменьшению потребления органического топлива и, соответственно, выбросов является внедрение систем солнечного ГВС (СГВС) в виде гелиоустановок, подключенных к

действующим котельным. Анализ показывает, что оптимальное замещение углеводородного топлива солнечной энергией с применением гелиоустановок находится в пределах 20–40 % для котельных с установочной мощностью до 1 МВт.

Эти установки могут быть одноконтурными и двухконтурными. Принципиальная схема двухконтурной гелиоустановки, предназначенной для мазутной котельной, представлена на рис. 1.

В практике преобразования солнечной энергии в тепловую широкое применение нашли плоские и вакуумно-трубчатые солнечные коллекторы (СК), из которых формируются гелиоустановки.

Рассмотрим более детально работу двухконтурной гелиоустановки в климатических условиях г. Севастополя [2].

Количество передаваемой в бак-аккумулятор полезной теплоты (Q_п) можно описать уравнениями теплового баланса и теплопередачи.

Уравнение теплового баланса

$$Q_p = 3,6 \cdot A \eta_k \sum_{i=1}^n q_i = (G_1 \cdot C_{p1} \delta t_1) \eta_1 = (G_2 \cdot C_{p2} \delta t_2) \eta_2, \tag{1}$$

где A – площадь гелиополя, м²;

η_к – коэффициент полезного действия (КПД) СК;

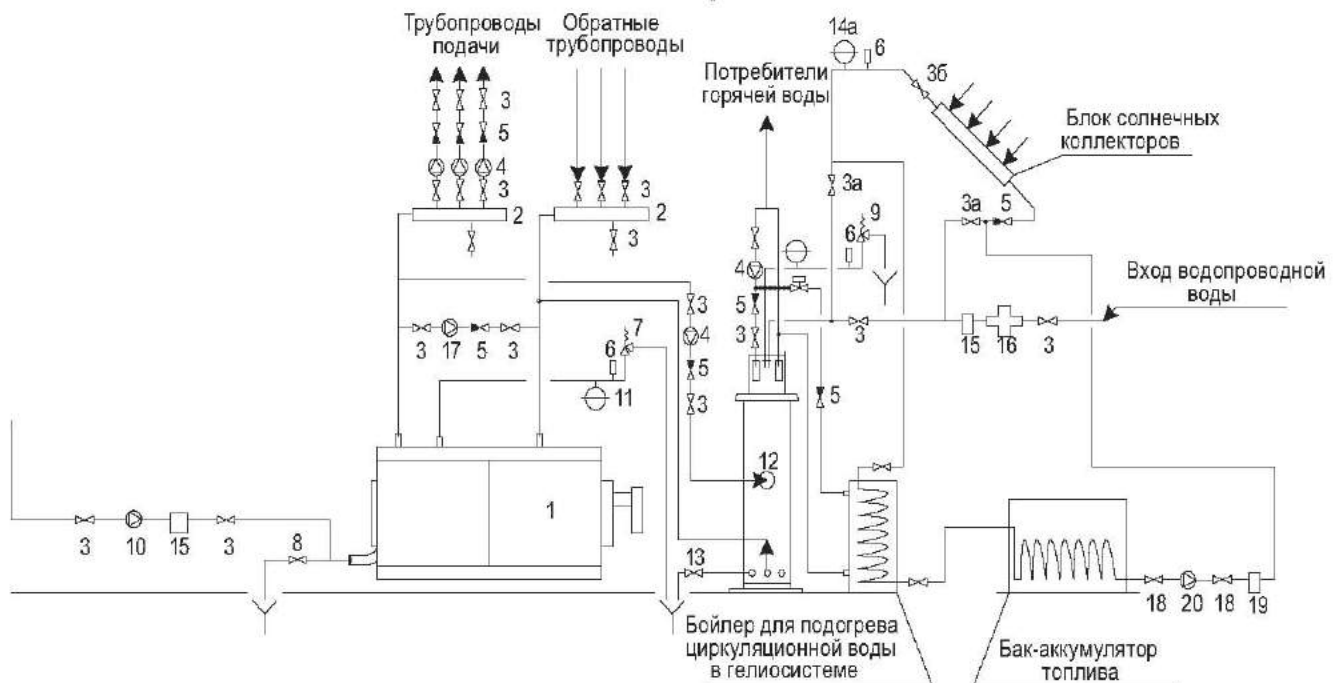


Рисунок 1 – Котельная с подключенной гелиоустановкой (площадь гелиополя 520 м²):

- 1 – котел; 2 – распределительный коллектор; 3 – запорные вентили котлоагрегата; 3а – запорные вентили солнечных коллекторов;
- 4 – циркуляционные насосы системы; 5 – обратные клапаны; 6 – автоматический воздушный клапан; 7 – предохранительный клапан котла; 8 – вентиль слива воды из котла; 9 – предохранительный клапан бойлера; 10 – подпиточный насос;
- 11 – расширительный бак системы котлоагрегата; 12 – бойлер; 13 – вентиль слива из бойлера; 14 – расширительный бак горячей воды; 14а – расширительный бак гелиосистемы; 15 – фильтр для умягчения воды; 16 – редукционный клапан давления;
- 17 – антиконденсатный насос; 18 – запорные клапаны насоса; 19 – фильтр для умягчения воды; 20 – насос



τ – среднее время работы гелиоустановки, час;
 q_i – количество часовой солнечной радиации (прямой и рассеянной), падающей на поверхность СК, Вт·час/м²;
 G_1, G_2 – количества нагреваемого теплоносителя 1-го контура и нагреваемой воды во 2-м контуре (бак-аккумулятор), кг/сут;
 C_{P1}, C_{P2} – удельные изобарные теплоемкости теплоносителя 1-го контура и нагретой воды соответственно, кДж/(кг·К);
 $\delta t_1, \delta t_2$ – приращение температур в 1-м и 2-м контурах, °С;
 η_1, η_2 – КПД теплообменников 1-го и 2-го контуров.

Уравнение теплопередачи

$$Q_n = kF \cdot \bar{\Delta t}, \quad (2)$$

где k – коэффициент теплопередачи теплообменной поверхности 1-го контура, Вт/(м²·К);
 F – площадь теплопередающей поверхности теплообменника 1-го контура, м²;
 Δt – среднелогарифмическая разность температур между теплоносителем и нагреваемой водой, °С.

Коэффициент полезного действия солнечного коллектора определяется по формуле

$$\eta_K = F' \left[(\alpha\beta) - \frac{\tau U_L (t_r - t_a)}{\sum_{i=1}^{\tau} q_i} \right], \quad (3)$$

где F' – конструктивная эффективность СК;
 α – коэффициент поглощения абсорбером солнечного излучения;
 β – оптический коэффициент прозрачной изоляции;
 U_L – коэффициент потерь СК в окружающую среду, Вт/м²·К;
 $t_r = 0,5(t_n + t_k)$, где t_n, t_k – соответственно начальная и конечная температуры теплоносителя в 1-м контуре, °С;
 t_a – расчетная температура воздуха в период работы СК.

Суммарное количество радиации, падающей в направлении СК, определяется выражением

$$\sum q_i = P_s \cdot J_s + P_D \cdot J_D, \quad (4)$$

где P_s – коэффициент, учитывающий угол наклона СК в календарном месяце (определяется по табл. [4]);
 J_s, J_D – часовые суммы соответственно прямой и рассеянной солнечной радиации на горизонтальную поверхность, Вт·час/м²;
 $P_D = \cos^2 \varphi / 2 = \text{const} = \cos^2(30/2) = 0,375$ – при наклоне гелиополя к горизонту под углом 30°.

Проанализируем изменения КПД (формула 3) плоского и вакуумно-трубчатого коллекторов в составе гелиоустановки по месяцам в течение года. Для этих солнечных коллекторов приняты следующие техниче-

ские параметры: $F' = 0,95$; $\alpha = 0,9$; $\beta = 0,86$; $U_L = 4,3$ Вт/(м²·К) (для плоского СК) и $U_L = 2,0$ Вт/(м²·К) (для трубчатого СК).

Для неотапительного периода (апрель–октябрь) время работы (τ) гелиоустановки в течение светового дня принимаем равным 9 часам (с 8:00 до 17:00); для отопительного периода (ноябрь–март) усредненное $\tau = 5$ часам (с 10:00 до 15:00).

Расчетные температуры окружающего воздуха в соответствующем месяце берутся в интервале времени работы гелиоустановки. КПД по месяцам в течение года и, соответственно, количество замещаемого топлива дублирующего источника солнечной энергией (в процентах) представлены на рис. 2, 3 и 4.

При определении площади гелиополя расчетным месяцем, обеспечивающим ССГВС Севастополя достаточным количеством солнечной энергии, в соответствии с п. 4.1 [4] был принят безоблачный (условно) июль, т.е. принято допущение, что в этом месяце дублирующий источник не включался и энергия, необходимая для горячего водоснабжения, полностью замещалась солнечной.

Из рис. 2, 3 и 4 видно, что в связи с изменением КПД СК, уровня солнечной радиации и температуры окружающего воздуха в течение года возможность замещения топлива дублирующего источника солнечной энергией снижается. К примеру, в отопительный период (ноябрь–март) она составляет 2,5 % для плоских СК и 10 % – для вакуумно-трубчатых. Таким образом, для увеличения процента замещения топлива дублирующего источника солнечной энергией необходимо изменить расчетный

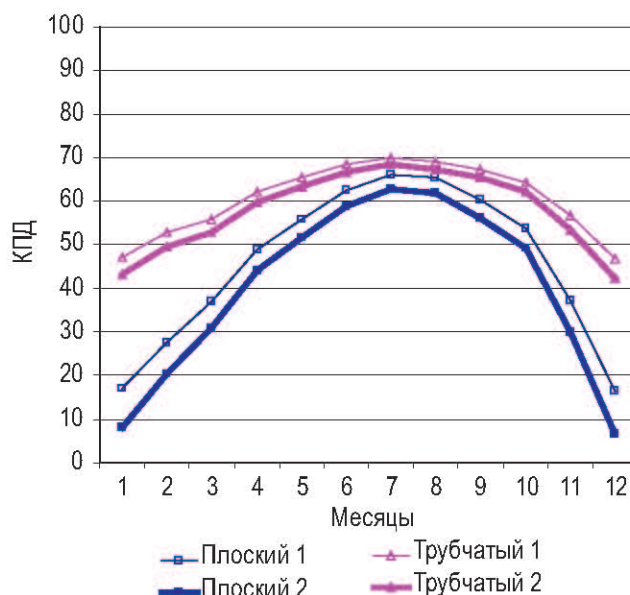


Рисунок 2 – График изменения КПД (%) плоского и трубчатого вакуумированных солнечных коллекторов по месяцам (максимальная температура теплоносителя на входе в теплообменник 1-го контура равна: вариант 1 – 50 °С; вариант 2 – 60 °С)

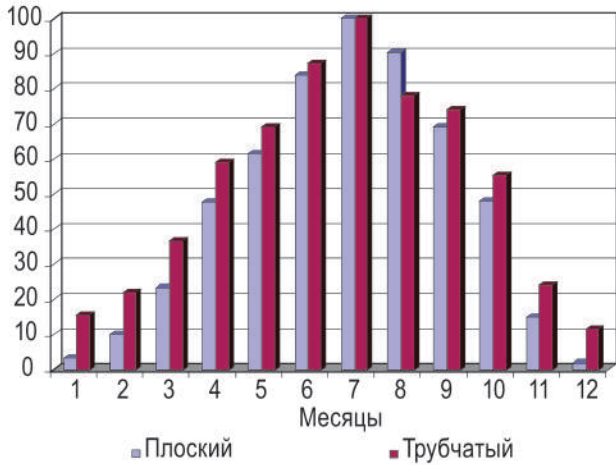


Рисунок 3 – Гистограмма замещения топлива (%) дублирующего источника солнечной энергией по месяцам при использовании плоского либо вакуумно-трубчатого СК (температура теплоносителя на входе в теплообменник 1-го контура равна 50°C)

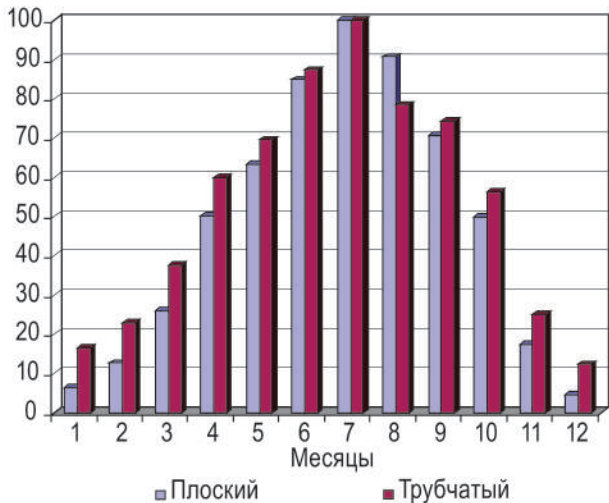


Рисунок 4 – Гистограмма замещения топлива (%) дублирующего источника солнечной энергией по месяцам при использовании плоского либо вакуумно-трубчатого СК (температура теплоносителя на входе в теплообменник 1-го контура равна 60°C)

месяц при определении площади гелиополя. Это условие можно обосновать исходя из технических и экономических требований.

Для сезонного горячего водоснабжения наиболее широко применяется гелиоустановка, структурная схема которой представлена на рис. 5.

Пространственное размещение СК выбирают с учетом типа застройки, ландшафтных и климатических условий. Из-за ограниченности площадей их, как правило, размещают на кровле здания (на соответствующих опорах). Оптимальная ориентация СК – на юг с возможным отклонением на восток (до 20°) или запад (до 30°).

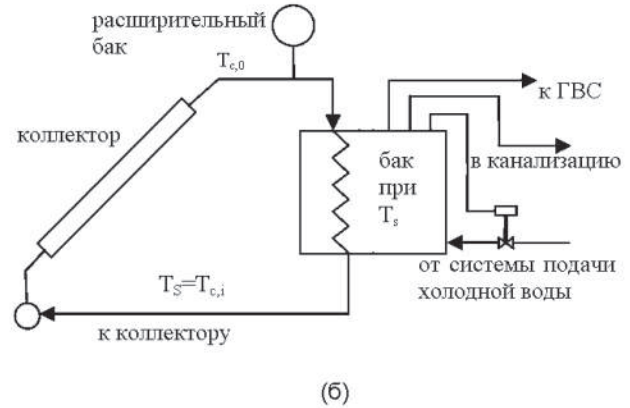
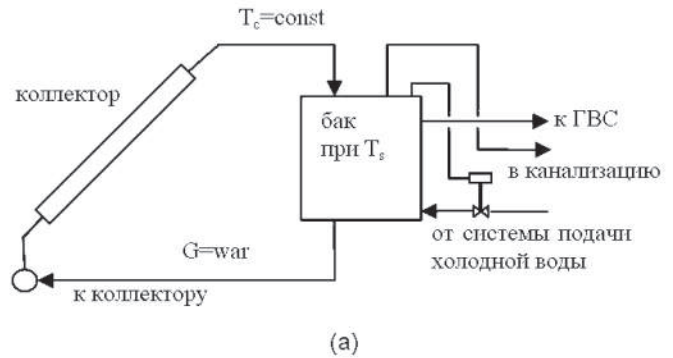


Рисунок 5 – Схема системы горячего водоснабжения: а) одноконтурная; б) двухконтурная

Угол наклона СК к горизонту для установок, работающих в летний период, должен быть равен широте местности минус 15°. Расчет опорных конструкций под СК ведется с учетом ветровой и снеговой нагрузок. Для сейсмических зон учитываются и сейсмические воздействия.

Суммарное количество теплоты Q, выработанной установкой в течение сезона, определяется по формуле

$$Q = A \sum_{z, n, i} g_i \eta_i, \text{ ГДж} \quad (5)$$

где A – площадь гелиополя, рассчитанная при среднем-дневном уровне радиации расчетного месяца, м²;
z – расчетное количество месяцев работы гелиоустановки в течение сезона;
n – число дней в месяце;
i – расчетный месяц;
g_i – средневенной уровень радиации в расчетном месяце.

Выполним аналитический анализ оптимального размещения СК в неотапливаемый период для климатических условий Севастопольского региона. В расчетах будем принимать, что СК направлены на юг, угол их наклона к горизонту меняется (30°, 45°, 60°). Сравним КПД таких СК с коллектором, лежащим на поверхности кровли горизонтально. Отметим, что для ориентации в пространстве солнечных коллекторов в составе гелиоустановки требуются опорные конструкции, расходы



на которые составляют 10–15 % от общей суммы затрат на ее строительство.

Примем средние технические параметры СК – плоского ($F=0,95$; $\alpha=0,9$; $\beta=0,86$; $U_L=4,3$ Вт/м²) и вакуумно-трубчатого ($F=0,95$; $\alpha=0,9$; $\beta=0,86$; $U_L=2,0$ Вт/м²). Расчетные изменения КПД гелиоустановки сезонного действия по месяцам представлены на рис. 6.

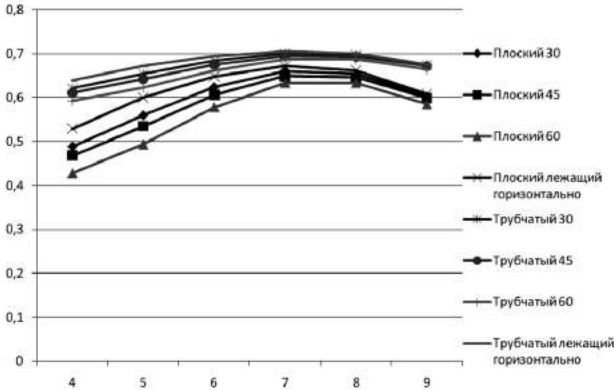


Рисунок 6 – График изменения КПД плоского и вакуумно-трубчатого СК по месяцам с различным углом наклона коллектора к горизонту

Как видно из рис. 6, имеется обратно пропорциональная зависимость между КПД СК и углом наклона коллектора к горизонту. При увеличении этого угла КПД СК уменьшается. Отсюда можно сделать вывод, что для климатических условий Севастопольского региона наиболее эффективными являются солнечные коллекторы, лежащие горизонтально. Таким образом, прежде чем строить солнечные установки сезонного действия в конкретном регионе, необходимо выполнить аналогичный анализ. Для более точной оценки возможности замещения какого-либо вида углеводородного топлива солнечной энергией следует предварительно получить информацию об удельных показателях работы гелиоустановки. С этой целью определим расчетное количество замещаемого топлива при работе 1 м² гелиополя двухконтурной гелиоустановки круглогодичного действия в рассматриваемых вариантах СК.

Из уравнения (1) следует, что площадь гелиополя можно определить по формуле

$$A = \frac{G_1 \cdot C_{P_1} \cdot \delta t_1}{3,6 \cdot \eta_K \sum_{i=1}^{\tau} q_i} \quad (6)$$

Как правило, G_2 и δt_2 задаются заказчиком, тогда

$$G_1 = \frac{G_2 \cdot C_{P_2} \cdot \delta t_2}{C_{P_1} \cdot \delta t_1}, \text{ кг/сут.} \quad (7)$$

Подставляя (7) в (6), получим

$$A = \frac{G_2 \cdot C_{P_2} \cdot \delta t_2}{3,6 \cdot \eta_K \sum_{i=1}^{\tau} q_i}, \quad (8)$$

т.е. уравнения (6) и (8) эквивалентны. Из (1) следует, что благодаря каждому квадратному метру гелиополя в течение одного светового дня экономится органическое топливо в тепловом эквиваленте

$$Q_T^{DH} = 3,6 \cdot \eta_K \sum_{i=1}^{\tau} q_i, \text{ кДж.} \quad (9)$$

Годовая экономия топлива составит

$$Q_T^{ГОД} = 3,6 \sum_{j=1}^{12} \eta_K^j \cdot n \sum_{i=1}^{\tau} q_i, \text{ кДж,} \quad (10)$$

где j – количество месяцев работы установки; η_K^j – КПД коллектора в расчетном месяце; n – количество дней в расчетном месяце.

Количество замещаемого топлива в котельных G_3 солнечной энергией можно определить по формуле

$$G_3 = 3,6 \cdot 10^{-3} \sum_{j=1}^{12} \eta_K^j \cdot \sum_{i=1}^n q_i / \eta_{д.и} \cdot Q_{IT}^H, \text{ кг/год,} \quad (11)$$

где $\eta_{д.и}$ – КПД дублирующего источника энергии; Q_{IT}^H – низшая теплота сгорания i -го топлива основного источника энергии, МДж/кг.

В соответствии с [1] низшая теплота сгорания равна: Q_{y}^H донецкого угля марки А – 24,3 МДж/кг; Q_{m}^H мазута марки М-40 – 40 МДж/кг; Q_r^H природного газа – 45,75 МДж/кг.

При расчете экономии условного топлива используются следующие соотношения

$$G_{yt} = G_3 \cdot \mathcal{E}_{yt}, \quad (12)$$

$$\mathcal{E}_{yt} = \frac{Q_{i3}^H}{29,302}, \quad (13)$$

где 29,302 МДж/кг – эквивалент теплоты сгорания условного топлива.

Таким образом, эквиваленты условного топлива для различных видов фактически сжигаемого топлива дублирующими источниками будут составлять: для газа – $\mathcal{E}_{yt} = 45,75/29,302 = 1,561$; для мазута – $\mathcal{E}_{yt} = 40/29,302 = 1,365$; для угля донецкого марки А – $\mathcal{E}_{yt} = 24,3/29,302 = 0,829$.

Полученные расчетные удельные значения экономии органического топлива с 1 м² гелиополя применительно к климатическим условиям Севастопольского региона сведены в табл. 2.

ВЫВОДЫ

Использование природных ресурсов в системах ГВС в сфере ЖКХ Украины возможно и целесообразно путем

Таблица 2 – Экономия топлива при использовании плоского и вакуумно-трубчатого СК

Вид топлива	Плоский СК				Вакуумно-трубчатый СК			
	Температура в баке-аккумуляторе				Температура в баке-аккумуляторе			
	45 °С		50 °С		45 °С		50 °С	
	фактич., кг/год	кг услов. топлива в год	фактич., кг/год	кг услов. топлива в год	фактич., кг/год	кг услов. топлива в год	фактич., кг/год	кг услов. топлива в год
Электронагрев	306,07	267,2	302,28	263,9	391,73	341,9	376,72	328,9
Мазут	66,62	90,9	65,8	89,8	85,27	116,4	82,0	111,9
Уголь	138,40	114,7	136,68	113,3	177,0	146,0	170,3	141,2
Природный газ (газовый котел)	92,79	81,0	91,64	80,0	118,76	103,7	114,21	99,7

применения гелиоустановок, подключаемых к котельным с установочной мощностью до 1 МВт. Оптимальная доля замещения углеводородного топлива солнечной энергией составляет 20–40 %.

Предложены уравнения, позволяющие оценить количество замещаемого углеводородного топлива при внедрении гелиоустановок круглогодичного действия.

Выполнена оценка количества замещаемого топлива с 1 м² гелиополя для серийных СК применительно к климатическим условиям Севастопольского региона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Викиди забруднювальних речовин в атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення. – К. : КВІЦ, 2002. – 43 с.
2. Сперанская, Ю.Ю. Параметры двухконтурных систем солнечного теплоснабжения для энергоснабжения частных домов и коттеджей / Ю.Ю. Сперанская, О.И. Горбатов, В.В. Макаров // Відновлювана енергетика. – 2011. – № 2 (25). – С. 33–39.
3. Даффи, Дж.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Дж.А. Даффи, У.А. Бекман ; под ред. Вишнякова В. – М. : Мир, 1977. – 420 с.
4. ВСН 52–86. Установки солнечного горячего водоснабжения. Нормы проектирования / Гражданстрой. – М. : Стройиздат, 1988.
5. Сперанская, Ю.Ю. Экологические проблемы теплоснабжения сельских регионов Украины / Ю.Ю. Сперанская, В.В. Макаров // Экология и промышленность. – 2012. – № 1. – С. 30–34.
6. Макаров, В.В. Использование солнечных установок для сезонного горячего водоснабжения / В.В. Макаров, Е.К. Горалевич, О.И. Горбатов // Вестник СевНТУ. Сер. Механика, энергетика, экология : сб. науч. тр. – Севастополь, 2011. – Вып. 119. – С. 98–104.

Поступила в редакцию 17.12.2012

Разглянуто питання застосування систем гарячого водопостачання на основі використання сонячної енергії. Виконано аналіз доцільності та ефективності їх застосування, зроблено оцінку кількості замінюваного палива з 1 м² геліополя для серійних сонячних колекторів відповідно до кліматичних умов Севастопольського району Криму.

In the paper the hot water supply solar systems in the form of attachments for the operating boilers are considered, the expediency and efficiency analysis of their application is carried out. The substitute fuel quantity evaluation from 1 m² of solar field for the serial solar collectors in the context of Sevastopol region climatic conditions is performed.