

УДК 697.7

А.В. Дологлонян, доцент, канд. техн. наук*Севастопольский национальный технический университет**Ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99033**E-mail: dologlonyan@hotmail.com***ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КАСКАДНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК**

Исследована задача оптимизации каскадных солнечных водонагревательных установок по усредненным теплотехническим параметрам, приведены примеры такой оптимизации для двух- и трехкаскадных установок.

Ключевые слова: оптимизация, солнечные водонагревательные установки, теплотехнические параметры.

Энергетическая проблема является ключевой среди технических, экономических и социальных проблем общества. Обеспечение потребностей в энергии в современном мире вызывает необходимость глубокой перестройки в топливно-энергетическом комплексе, как в сфере получения, так и в сфере потребления энергии.

Одним из важных направлений этой перестройки является экономия органического топлива за счет использования возобновляемых источников энергии.

Наибольшей степенью «технической готовности» характеризуется направление, связанное с преобразованием солнечной энергии в теплоту невысокого потенциала, достаточного для горячего водоснабжения, отопления или охлаждения воздуха в жилых, общественных и производственных помещениях.

Солнечные водонагревательные установки (СВУ) хорошо зарекомендовали себя в зонах от 50° с.ш. до 50° ю.ш. Анализ проектов и строительства СВУ показал, что структура капитальных затрат выглядит следующим образом: солнечные коллекторы – 40...67%; металлоконструкции и трубопроводы – 15...27%; бак-аккумулятор – 9...38%; прочие расходы – 4...6%.

Из этой структуры следует, что приоритетным направлением снижения капитальных затрат на системы солнечного теплоснабжения является совершенствование и снижение стоимости солнечных коллекторов.

Тепловая эффективность солнечных коллекторов тем выше, чем меньше средняя температура жидкости. Зависимость эта для разных типов коллекторов различна — при низких температурах более эффективны простые, а значит более дешевые коллекторы, при высоких — наоборот.

Одним из перспективных способов повышения экономичности солнечных установок является ступенчатое повышение температуры теплоносителя. При этом на первых ступенях теплоноситель нагревается в солнечных коллекторах простейших конструкций, на последующих – в более совершенных коллекторах либо в традиционных генераторах теплоты.

Многообразие схемных решений каскадных установок с использованием солнечного излучения можно свести к трем основным типам: солнечные коллекторы – солнечные коллекторы; солнечные коллекторы – традиционные источники теплоты; солнечные коллекторы – тепловые насосы.

Будут исследованы каскадные установки первого типа.

В каскадных установках первого типа наиболее целесообразно применять солнечные коллекторы без прозрачной, а иногда и без тыльной тепловой изоляции (абсорберы). При правильной оптимизации такая установка будет меньше чем одноступенчатая на 8...12%, а по стоимости на 15...20%.

Трехкаскадная установка для горячего водоснабжения, отопления и технологических нужд разработана в Японии (рисунок 1). Первая ступень состоит из абсорберов и нагревает теплоноситель до

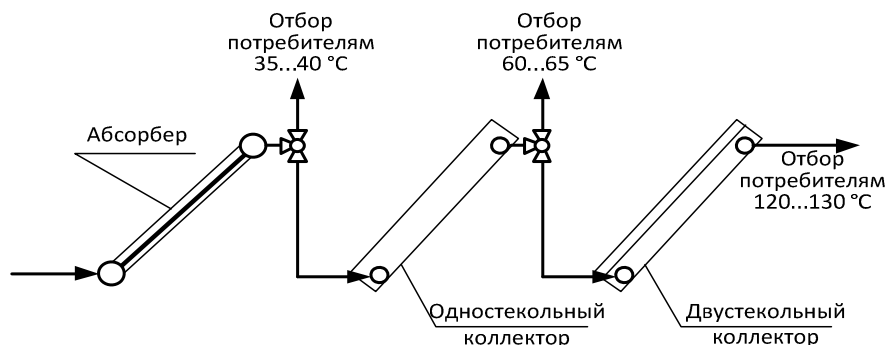


Рисунок 1 – Трехкаскадная установка для горячего водоснабжения, отопления и технологических нужд

температуры 35...40 °С, вторая – из одностекольных солнечных коллекторов нагревающих до 60...65 °С, третью ступень составляют коллекторы с двойным остеклением и селективным поглотителем, в которых теплоноситель может быть догрет до 120...130 °С.

Рассмотрим оптимизацию двухкаскадной системы. Для начала необходимо сформулировать условия, при которых может быть создана двухкаскадная установка, более эффективная, чем обычная (состоящая из одного типа солнечных коллекторов).

Пусть существуют два типа солнечных коллекторов (СК) и для них выполняются следующие условия:

$$\begin{aligned}(F'\eta_0)_1 &> (F'\eta_0)_2; \\ (F'U_L)_1 &> (F'U_L)_2.\end{aligned}\quad (1)$$

Здесь $F'U_L$ – произведение коэффициента эффективности поглощающей панели на коэффициент тепловых потерь СК, Вт/(м² К); $F'\eta_0$ – произведение коэффициента эффективности поглощающей панели на оптический КПД СК; индекс 1 относится, например, к неостекленным СК, индекс 2, например, – к остекленным СК.

Допустим, условия (1) будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned}(F'\eta_0)_1 &\leq (F'\eta_0)_2; \\ (F'U_L)_1 &> (F'U_L)_2.\end{aligned}\quad (1a)$$

Тогда применение СК первого типа теряет всякий смысл, кроме, может быть, экономического.

Допустим условия (1) будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned}(F'\eta_0)_1 &> (F'\eta_0)_2; \\ (F'U_L)_1 &\leq (F'U_L)_2.\end{aligned}\quad (1б)$$

Тогда применение СК второго типа теряет всякий смысл.

Таким образом, условия (1) являются необходимыми и достаточными для создания двухкаскадной солнечной водонагревательной установки (СВУ).

Задача оптимизации состоит в том, чтобы подобрать такое соотношение площадей неостекленных (СК первого типа) и остекленных (СК второго типа) СК, при котором КПД солнечной водонагревательной установки был бы максимальным при неизменной общей площади коллекторов первого и второго типа.

КПД η двухкаскадной СВУ, как и любого солнечного коллектора равен [2]:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{IA}, \quad (2)$$

где $\dot{Q}_u = Gc_p(t_o - t_i)$ – полезный тепловой поток, полученный от СК, Вт; I – плотность потока суммарной солнечной радиации в плоскости СК, Вт/м²; A – общая площадь поверхности СК, м²; t_o – температура на выходе из СК СВУ, °С; t_i – температура воды на входе в СК СВУ, °С.

Поскольку величины A и I в данной постановке задачи являются постоянными, то для того, чтобы КПД СВУ был максимальным, исходя из (2) очевидно, что $\dot{Q}_u$ должен иметь максимум.

Обозначим через $x_* = \frac{A_m}{A}$, где A_m – текущая площадь СК; $z_* = \frac{A_1}{A}$, где A_1 – площадь неостекленных СК.

Так как для СК зависимость температуры воды от величины x_* имеет следующий вид [2]:

$$t(x_*) = T - \Delta T e^{-NTUx_*} = t_i + \Delta T (1 - e^{-NTUx_*}), \quad \Delta T = T - t_i, \quad T = t_a + \frac{F'\eta_0}{F'U_L} I, \quad 0 \leq x_* \leq 1,$$

то для двухкаскадной СВУ можно записать следующее выражение для теплового потока

$$\dot{Q}_u = Gc_p \left\{ (T_2 - t_i) - \left[(T_2 - T_1) + (T_2 - t_i) e^{-NTU_1 z_*} \right] e^{-NTU_2 (1 - z_*)} \right\}, \quad (3)$$

где $T_1 = t_a + \frac{(F'\eta_0)_1}{(F'U_L)_1} I$, °С; $T_2 = t_a + \frac{(F'\eta_0)_2}{(F'U_L)_2} I$, °С; t_a – температура окружающего воздуха, °С;

$NTU_1 = \frac{(F'U_L)_1 A}{Gc_p}$; $NTU_2 = \frac{(F'U_L)_2 A}{Gc_p}$; G – расход воды через СВУ, кг/с; c_p – теплоемкость воды при постоянном давлении, Дж/(кг К).

Определим оптимум для величины $\dot{Q}_u$ в соответствии с (3), приравняв нулю ее производную по z_* :

$$\frac{\partial \dot{Q}_u}{\partial z_*} = Gc_p \left\{ NTU_1 \Delta T_1 e^{-NTU_1 z_*} e^{-NTU_2(1-z_*)} - NTU_2 \left[(T_2 - T_1) + \Delta T_1 e^{-NTU_1 z_*} \right] e^{-NTU_2(1-z_*)} \right\} = 0, \quad (4)$$

где $\Delta T_1 = T_1 - t_i$; $\Delta T_2 = T_2 - t_i$.

Путем несложных преобразований из (4) можно получить выражение для z_{*opt}

$$z_{*opt} = -\frac{1}{NTU_1} \ln \frac{1 - \theta_{12}}{\theta_{12}(KU_{12} - 1)}, \quad (5)$$

где $\theta_{12} = \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}$, $KU_{12} = \frac{(F'U_L)_1}{(F'U_L)_2}$.

Потребная площадь неостекленных СК находится из (5) с учетом $z_* = \frac{A_1}{A}$:

$$A_1 = -\frac{Gc_p}{(F'U_L)_1} \ln \frac{1 - \theta_{12}}{\theta_{12}(KU_{12} - 1)}. \quad (6)$$

Из (5) и (6) видно, что необходимым условием существования двухкаскадной СВУ являются условия

$$\theta_{12} < 1; KU_{12} > 1, \quad (7)$$

что становится возможным только, когда выполняются условия (1).

Найдем вторую производную $\frac{\partial^2 \dot{Q}_u}{\partial z_*^2}$ и разделим результат на величину $NTU_1^2 \Delta T_1 e^{-[NTU_1 z_* + NTU_2(1-z_*)]}$, которая положительна, учитывая (7), в итоге получим выражение $-\left(1 - \frac{1}{KU_{12}^2}\right) - \left(\frac{1}{\theta_{12}} - 1\right) \frac{e^{-NTU_1 z_*}}{KU_{12}^2} < 0$, а это означает – полученный оптимум является максимумом, и становится возможным, когда выполняются условия (7) и (1).

Если условия (7) или (1) не выполняются, то сегмента АОВ (см. рисунок 2, а) не будет существовать, и из этих типов СК невозможно составить каскадную СВУ.

Зависимость $t = f(x_*)$ для двухкаскадной (см. рисунок 2) СВУ имеет вид:

$$t = T_1 - \Delta T_1 e^{-NTU_1 x_*}, \text{ при } x_* \leq z_{*opt}$$

$$t = T_2 - \left[(T_2 - T_1) + \Delta T_1 e^{-NTU_1 z_{*opt}} \right] e^{-NTU_2(x_* - z_{*opt})}, \text{ при } x_* > z_{*opt}, \quad (8)$$

Тогда температура воды на входе во второй каскад СВУ, учитывая (8), будет равна

$$t_{i2} = T_1 - \Delta T_1 e^{-NTU_1 z_{*opt}}. \quad (9)$$

Если выражение (9) подставить в (5), то можно получить зависимость для определения общей площади СК для СВУ, поскольку значения G , t_o определяются техническим заданием

$$A = -\frac{Gc_p}{(F'U_L)_2} \ln \frac{1 - \eta_{i2}}{KU_{12} \theta_{12} \left[\frac{1 - \theta_{12}}{\theta_{12}(KU_{12} - 1)} \right]^{1 - \frac{1}{KU_{12}}}}, \quad (10)$$

где $\eta_{i2} = \frac{t_o - t_i}{\Delta T_2}$.

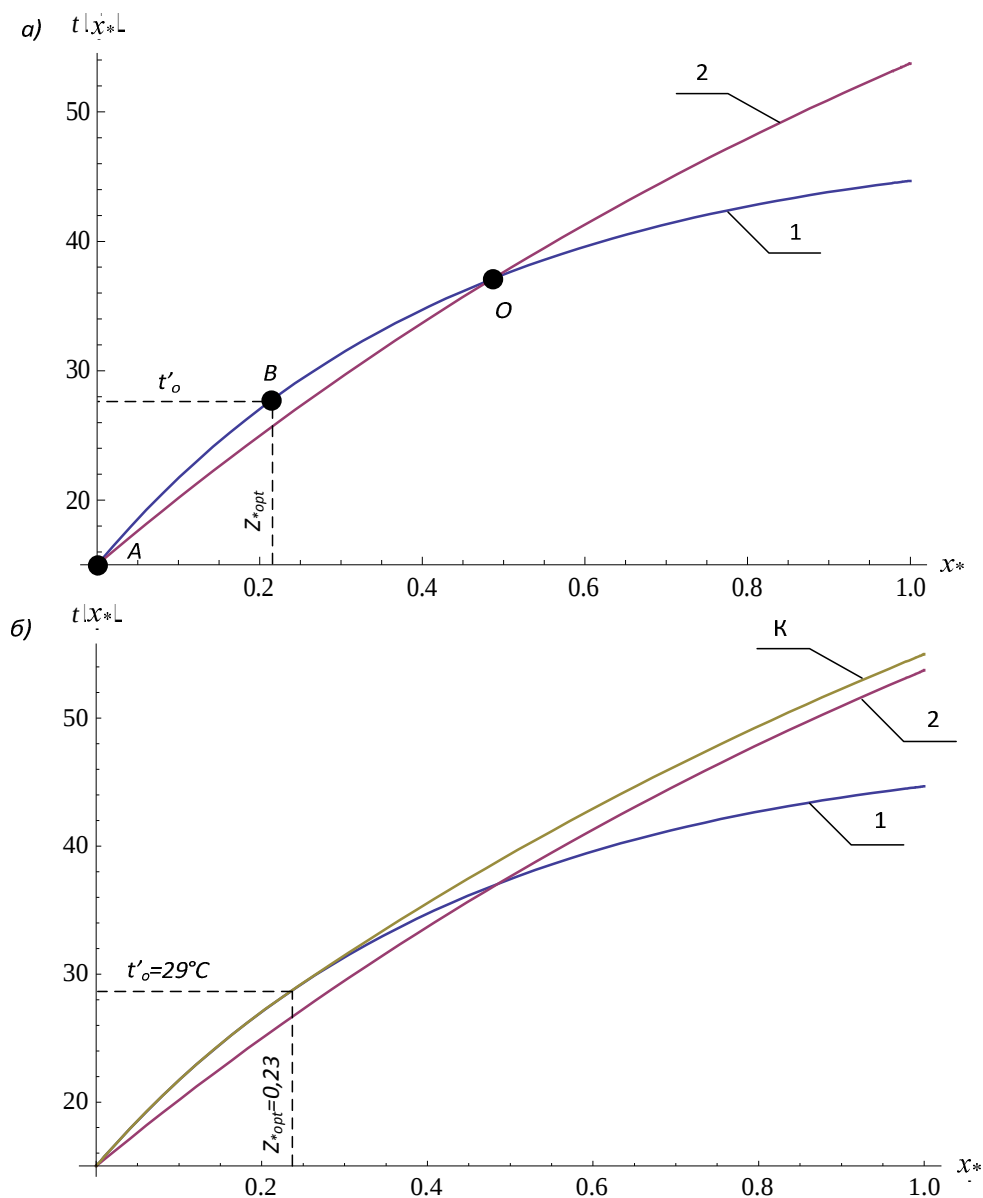


Рисунок 2 – Зависимость $t = f(x^*)$ для двухкаскадной СВУ при $g = \frac{G}{A} = 2,1 \cdot 10^{-3}$, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$:

1 – для СК без прозрачной изоляции; 2 – для СК с одним слоем прозрачной изоляции;
К – для двухкаскадной системы

Если выполняются условия (7) или (1), то выполняется неравенство:

$$0 < KU_{12}\theta_{12} \left[\frac{1-\theta_{12}}{\theta_{12}(KU_{12}-1)} \right]^{1-\frac{1}{KU_{12}}} < 1 \quad (11)$$

и подлогарифмическое выражение является положительным.

Площадь однокаскадной СВУ из остекленных коллекторов определяется по выражению:

$$A_{n2} = -\frac{Gc_p}{(F'U_L)_2} \ln(1-\eta_{i2}). \quad (12)$$

Сравнивая A_{n2} (выражение 12) с A (выражение 10) с учетом неравенства (11) можно сделать вывод, что

$$A < A_{n2}.$$

Увеличение КПД двухкаскадной СВУ по сравнению с однокаскадной можно определить из следующего выражения

$$\frac{\eta}{\eta_{H2}} = \frac{A_{H2}}{A} = \frac{1}{1 - \frac{\ln \left\{ KU_{12} \theta_{12} \left[\frac{1 - \theta_{12}}{\theta_{12} (KU_{12} - 1)} \right]^{1 - \frac{1}{KU_{12}}} \right\}}{\ln(1 - \eta_{i2})}} > 1. \quad (13)$$

Для Крыма среднее сезонное значение $\bar{t}_a, \bar{I}$ составляют [1]:

$$\bar{t}_a = 21,6, \text{ } ^\circ\text{C}; \bar{I} = 577, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Типичное значение для ординарных СК (однослойная прозрачная изоляция, черная матовая поверхность) $F'U_L$ и $F'\eta_0$ составляют [2]:

$$(F'U_L)_2 = 6, \text{ Вт/м}^2; (F'\eta_0)_2 = 0,75;$$

для неостекленных СК (первого типа) [3]:

$$(F'U_L)_1 = 20, \text{ Вт/м}^2; (F'\eta_0)_1 = 0,92.$$

В СВУ предназначенных для горячего водоснабжения воду выше 55°C не нагревают. Температура на входе в СВУ принимается $t_i = 15^\circ\text{C}$ [4]. В соответствии с (13) для этих условий $\frac{\eta}{\eta_H} = 1,052$, т.е. КПД СВУ увеличился на 5,2 %, а, соответственно, настолько же сократилась общая площадь СК.

Величина z_{*opt} находится из выражения (5) с учетом (10)

$$z_{*opt} = \frac{\ln \frac{1 - \theta_{12}}{\theta_{12} (KU_{12} - 1)}}{KU_{12} \ln \frac{1 - \eta_{i2}}{KU_{12} \theta_{12} \left[\frac{1 - \theta_{12}}{\theta_{12} (KU_{12} - 1)} \right]^{1 - \frac{1}{KU_{12}}}}} . \quad (14)$$

Для указанного примера z_{*opt} в соответствии с (14) составит: $z_{*opt} = 0,23$ (рисунок 1, б). Таким образом, количество неостекленных СК для оптимизированной двухкаскадной СВУ составило 23 %, что соответствует рисунку 1.

Сокращение общей площади СК за счет оптимизации, а также замена части (23 %) дорогих остекленных СК на более дешевые неостекленные, позволяет снизить стоимость СВУ на 10...20 % и увеличить ее конкурентоспособность.

Рассмотрим оптимизацию трехкаскадной системы. Для начала необходимо сформулировать условия, при которых трехкаскадная установка может быть создана.

Пусть существуют три типа солнечных коллекторов (СК) и для них выполняются следующие условия:

$$\begin{aligned} (F'\eta_0)_1 &> (F'\eta_0)_2 > (F'\eta_0)_3; \\ (F'U_L)_1 &> (F'U_L)_2 > (F'U_L)_3. \end{aligned} \quad (15)$$

В выражении (15) индекс 1 относится, например, к неостекленным СК, индекс 2 – к остекленным СК с одним слоем прозрачной изоляции, индекс 3 – к остекленным СК с двумя слоями прозрачной изоляции.

Проводя рассуждения аналогичные для двухкаскадных СВУ, можно сделать вывод, что условия (15) являются необходимыми и достаточными для создания трехкаскадной солнечной водонагревательной установки (СВУ)

Если условия (15) выполняются, то для этих трех типов СК можно составить трехкаскадную солнечную водонагревательную установку (СВУ).

Задача оптимизации состоит трехкаскадной СВУ в том, чтобы подобрать такое соотношение площадей СК первого, второго и третьего типа, при котором КПД солнечной водонагревательной установки (СВУ) был бы максимальным.

Введем некоторые обозначения:

$$z_{*1} = \frac{A_1}{A}; z_{*2} = \frac{A_1 + A_2}{A}; NTU_3 = \frac{(F'U_L)_3 A}{Gc_p},$$

где A_1, A_2, A – площади СК первого, второго типов и общая площадь СВУ соответственно;

Учитывая зависимость температуры воды $t = f(x_*)$ для СК трех типов, удовлетворяющих условиям (15), показанную на рисунке 3:

$$t = T_1 - \Delta T_1 e^{-NTU_1 x_*}, \text{ при } x_* \leq z_{*1};$$

$$t = T_2 - \left[(T_2 - T_1) + \Delta T_1 e^{-NTU_1 z_{*1}} \right] e^{-NTU_2 (x_* - z_{*1})}, \text{ при } z_{*2} > x_* > z_{*1};$$

$$t = T_3 - \left\{ (T_3 - T_2) + \left[(T_2 - T_1) + \Delta T_1 e^{-NTU_1 z_{*1}} \right] e^{-NTU_2 (z_{*2} - z_{*1})} \right\} e^{-NTU_3 (x_* - z_{*2})}, \text{ при } 1 \geq x_* \geq z_{*2}$$

можно получить выражение для величины t_o (рисунок 3)

$$t_o = T_3 - \left\{ (T_3 - T_2) + \left[(T_2 - T_1) + \Delta T_1 e^{-NTU_1 z_{*1}} \right] e^{-NTU_2 (z_{*2} - z_{*1})} \right\} e^{-NTU_3 (1 - z_{*2})}. \quad (16)$$

Тогда с учетом (16) выражение для $\dot{Q}_u = f(z_{*1}, z_{*2})$ примет вид:

$$\dot{Q}_u = Gc_p \left\langle \Delta T_3 - \left\{ (T_3 - T_2) + \left[(T_2 - T_1) + \Delta T_1 e^{-NTU_1 z_{*1}} \right] e^{-NTU_2 (z_{*2} - z_{*1})} \right\} e^{-NTU_3 (1 - z_{*2})} \right\rangle. \quad (17)$$

Из выражения (2) видно, что для нахождения максимума КПД трехкаскадной СВУ необходимо решить нижеследующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial \dot{Q}_u}{\partial z_{*1}} = 0; \\ \frac{\partial \dot{Q}_u}{\partial z_{*2}} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

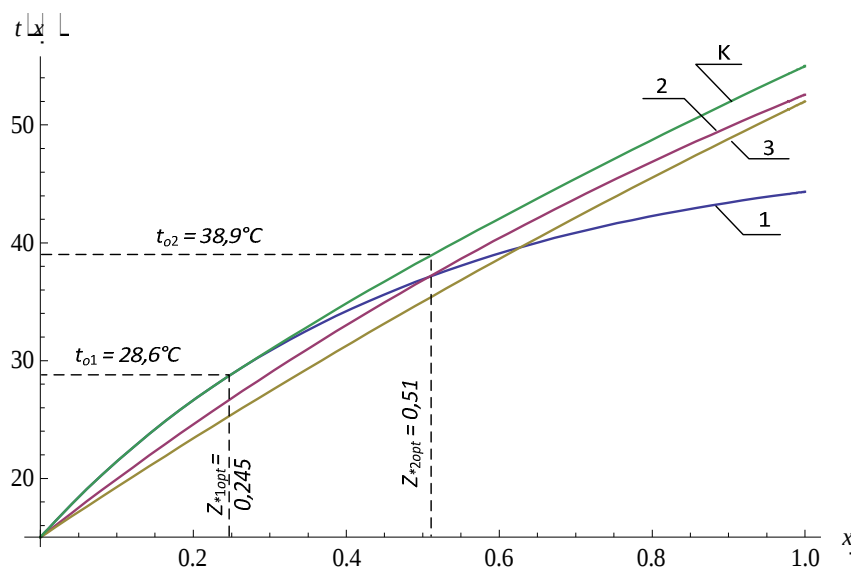


Рисунок 3 – Зависимость $t = f(x_*)$ для трехкаскадной СВУ при $g = \frac{G}{A} = 2,1 \cdot 10^{-3}, \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$:

1 – для СК без прозрачной изоляции; 2 – для СК с одним слоем прозрачной изоляции; 3 – для СК с двумя слоями прозрачной изоляции; К – для трехкаскадной системы

Решим первое уравнение системы (18) с учетом (17), получим:

$$\Delta T_1 NTU_1 e^{-NTU_1 z_{*1}} e^{-NTU_2 (z_{*2} - z_{*1})} e^{-NTU_3 (1 - z_{*2})} - \left[(T_2 - T_1) + \Delta T_1 e^{-NTU_1 z_{*1}} \right] NTU_2 e^{-NTU_2 (z_{*2} - z_{*1})} e^{-NTU_3 (1 - z_{*2})} = 0,$$

$$\text{или } \Delta T_1 NTU_1 e^{-NTU_1 z_{*1}} - \left[(T_2 - T_1) + \Delta T_1 e^{-NTU_1 z_{*1}} \right] NTU_2 = 0.$$

После преобразований можно получить выражения, определяющие z_{*1opt} и A_1 :

$$z_{*1opt} = -\frac{1}{NTU_1} \ln \frac{1-\theta_{12}}{\theta_{12}(KU_{12}-1)}, \quad (19)$$

следовательно,

$$A_1 = -\frac{Gc_p}{(F'U_L)_1} \ln \frac{1-\theta_{12}}{\theta_{12}(KU_{12}-1)}. \quad (20)$$

Решим второе уравнение системы (18) с учетом (17), получим:

$$\begin{aligned} & -NTU_3 \left\{ (T_3 - T_2) + \left[(T_2 - T_1) + \Delta T_1 e^{-NTU_1 z_{*1}} \right] e^{-NTU_2(z_{*2}-z_{*1})} \right\} e^{-NTU_3(1-z_{*2})} + \\ & + \left[(T_2 - T_1) + \Delta T_1 e^{-NTU_1 z_{*1}} \right] NTU_2 e^{-NTU_2(z_{*2}-z_{*1})} e^{-NTU_3(1-z_{*2})} = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

После подстановки (19) в (21) и некоторых преобразований получаются выражения для z_{*2opt} и A_2 :

$$z_{*2opt} = -\frac{1}{NTU_2} \ln \frac{1-\theta_{23}}{\theta_{23}(KU_{23}-1)KU_{12}\theta_{12} \left[\frac{1-\theta_{12}}{\theta_{12}(KU_{12}-1)} \right]^{1-\frac{1}{KU_{12}}}}; \quad (22)$$

$$A_2 = -\frac{Gc_p}{(F'U_L)_2} \ln \frac{\frac{1-\theta_{23}}{\theta_{23}(KU_{23}-1)}}{KU_{12}\theta_{12} \frac{1-\theta_{12}}{\theta_{12}(KU_{12}-1)}}. \quad (23)$$

Если подставить выражения (19) и (22) в (17) и провести несложные преобразования, то можно получить формулу для определения общей площади СВУ:

$$A = -\frac{Gc_p}{(F'U_L)_3} \ln \frac{1-\eta_{i3}}{KU_{23}\theta_{23} \left[\frac{1-\theta_{23}}{\theta_{23}(KU_{23}-1)} \right]^{1-\frac{1}{KU_{23}}} \left\{ KU_{12}\theta_{12} \left[\frac{1-\theta_{12}}{\theta_{12}(KU_{12}-1)} \right]^{1-\frac{1}{KU_{12}}} \right\}^{\frac{1}{KU_{23}}}}, \quad (24)$$

где $\eta_{i3} = \frac{t_o - t_i}{\Delta T_3}$, $\theta_{23} = \frac{\Delta T_2}{\Delta T_3}$, $KU_{23} = \frac{(F'U_L)_2}{(F'U_L)_3}$.

Если выполняются условия (15), то выполняется неравенство

$$0 < KU_{23}\theta_{23}(\Psi_{23})^{1-\frac{1}{KU_{23}}} \left[KU_{12}\theta_{12}(\Psi_{12})^{1-\frac{1}{KU_{12}}} \right]^{\frac{1}{KU_{23}}} < 1, \quad (25)$$

где $\Psi_{12} = \frac{1-\theta_{12}}{\theta_{12}(KU_{12}-1)}$; $\Psi_{23} = \frac{1-\theta_{23}}{\theta_{23}(KU_{23}-1)}$.

Найдем вторую производную $\frac{\partial^2 \dot{Q}_u}{\partial z_{*2}^2}$ и разделим результат на величину $NTU_3^2 \left[(T_2 - T_1) + \Delta T_1 e^{-NTU_1 z_{*1}} \right] e^{-NTU_2(z_{*2}-z_{*1})} e^{-NTU_3(1-z_{*2})}$, которая положительна, в итоге получим выражение:

$$-(KU_{23}-1)^2 - \frac{1-\theta_{23}}{\theta_{23} \left[(1-\theta_{12}) + \theta_{12} e^{-NTU_1 z_{*1}} \right] e^{-NTU_2(z_{*2}-z_{*1})}} < 0,$$

что становится возможным, если выполняются условия (15).

Найдем вторую производную $\frac{\partial^2 \dot{Q}_u}{\partial z_{*1}^2}$ и разделим результат на величину $NTU_1^2 \Delta T_1 e^{-[NTU_1 z_{*1} + NTU_2(z_{*2} - z_{*1}) + NTU_3(1 - z_{*2})]}$, которая положительна, в итоге получим выражение:

$$-\left(1 - \frac{1}{KU_{12}}\right)^2 - \left(\frac{1}{\theta_{12}} - 1\right) \frac{e^{NTU_1 z_{*1}}}{KU_{12}^2} < 0,$$

что также становится возможным, если выполняются условия (15). Это говорит о том, что полученные оптимумы являются максимумами.

Площадь однокаскадной СВУ из остекленных СК с двумя слоями прозрачной изоляции определяется выражением

$$A_{H3} = -\frac{Gc_p}{(F'U_L)_3} \ln(1 - \eta_{i3}). \quad (26)$$

Сравнивая A_{H3} (выражение 26) с A (выражение 24) с учетом неравенства (25) можно сделать вывод, что $A < A_{H3}$.

Увеличение КПД трехкаскадной СВУ по сравнению с однокаскадной можно определить из следующего выражения

$$\frac{\eta}{\eta_{H3}} = \frac{A_{H3}}{A} = \frac{1}{\ln \left\{ KU_{23} \theta_{23} (\psi_{23})^{1 - \frac{1}{KU_{23}}} \left[KU_{12} \theta_{12} (\psi_{12})^{1 - \frac{1}{KU_{12}}} \right]^{\frac{1}{KU_{23}}} \right\}} > 1. \quad (27)$$

На практике трехкаскадные СВУ имеют на последнем каскаде СК с двойной прозрачной изоляцией и поглощающую панель с селективным покрытием, имеют следующие характеристики: $(F'\eta_0)_3 \cong 0,66$; $(F'U_L)_3 \cong 3$, Вт/(м² К).

Трехкаскадные СВУ могут применяться не только для бытового горячего водоснабжения, но и для технологического т.к. могут подогревать воду до 90 °С и более.

Пусть имеются следующие исходные данные:

$$\bar{t}_d = 21,6, \text{ } ^\circ\text{C}; \bar{I} = 577, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \text{ (характерно для Крыма) [1, 4].}$$

$$(F'U_L)_1 = 20, \text{ Вт/(м}^2\text{ К)}; (F'\eta_0)_1 = 0,92 \text{ [3]; } (F'U_L)_2 = 6, \text{ Вт/(м}^2\text{ К)}; (F'\eta_0)_2 = 0,75 \text{ [1];}$$

$$(F'U_L)_3 \cong 3, \text{ Вт/(м}^2\text{ К)}; (F'\eta_0)_3 \cong 0,66 \text{ [1]; } t_i = 15 \text{ } ^\circ\text{C [4].}$$

Для указанных условий по формулам (19), (22) и (27) можно получить следующие результаты:

$$z_{*1opt} = 0,235; z_{*2opt} = 0,84; \frac{\eta}{\eta_H} = \frac{A_H}{A} = 1,177.$$

Рассчитаем КПД для различных компоновок СВУ и различных значений t_o . Результаты отобразим в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнительные оценки КПД для различных компоновок СВУ

№	Компоновка СК для СВУ	КПД СВУ / потребная площадь		
		$t_o = 55 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_o = 70 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_o = 90 \text{ } ^\circ\text{C}$
1	СВУ из СК с одним слоем прозрачной изоляции	0,586/17,4	0,477/29,4	0,256/74,7
2	Двухкаскадная СВУ	0,613/16,6	0,49/28,6	0,258/74
3	СВУ из СК с двумя слоями прозрачной изоляции	0,584/17,4	0,539/26	0,473/40,4
4	Трехкаскадная СВУ	0,642/15,9	0,573/24,4	0,492/38,8

Таблица наглядно демонстрирует, что трехкаскадная СВУ является самой эффективной во всем диапазоне изменений t_o .

В принципе возможно создание сколь угодно большого числа (n) каскадов, если выполняются условия:

$$\begin{aligned}(F'\eta_0)_1 &> (F'\eta_0)_2 > \dots > (F'\eta_0)_n; \\ (F'U_L)_1 &> (F'U_L)_2 > \dots > (F'U_L)_n\end{aligned}\quad (28)$$

Проводя рассуждения аналогичные рассуждениям для двух- и трехкаскадных СВУ можно получить рекуррентные зависимости для многокаскадных установок, например, площадь n -каскадной установки можно вычислить по формуле:

$$A_{n\Sigma} = -\frac{Gc_p}{F'U_{Ln}} \ln \frac{1-\eta_{in}}{\prod_{j=1}^{n-1} \left(KU_{j,j+1} \theta_{j,j+1} \psi_{j,j+1} \right)^{\frac{1-\frac{1}{KU_{j,j+1}}}{\prod_{k=j+1}^{n-1} \frac{1}{KU_{k,k+1}}}}}; \text{ если } k > n-1, \text{ то } \prod_{k=j+1}^{n-1} \frac{1}{KU_{k,k+1}} = 1,$$

$$\psi_{j,j+1} = \frac{1-\theta_{j,j+1}}{\theta_{j,j+1}(KU_{j,j+1}-1)}, \text{ индекс } j = 1, 2, 3 \dots n - \text{ соответствует типам СК.}$$

Или, например, для j -го каскада z^*_{jopt} определяется по формуле:

$$z^*_{jopt} = z^*_{j-1opt} - \frac{1}{NTU_j} \ln \frac{\psi_{j,j+1}}{KU_{j-1,j} \theta_{j-1,j} \psi_{j-1,j}}, \quad 1 < j < n-1.$$

Учитывая, что каскадная СВУ, в свою очередь, может быть предварительным каскадом к паровому котлу или тепловому насосу [3], можно сказать, что каскадная СВУ является обобщением различных типов СВУ. Задача оптимизации СВУ должна быть продолжена с использованием численных методов и технико-экономических показателей.

Библиографический список использованной литературы

1. Справочник по климату СССР. — Л.: Гидрометиздат, 1996. — 350 с.
2. Даффи Дж.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Дж. А. Даффи, У.А. Бекман. — М.: Мир, 1977. — 306 с.
3. Хайнрих Г. Теплонасосные установки для отопления и горячего водоснабжения / Г. Хайнрих, Х. Найорк, В. Нестеров. — М.: Стройиздат, 1986. — 351 с.
4. Рекомендации по проектированию установок солнечного горячего водоснабжения для жилых и общественных зданий. — К.: КиевЗНИИЭП, 1987. — 119 с.

Поступила в редакцию 23.03.2012 г.

Дологлонян А.В. Теплотехнічна оптимізація каскадних сонячних водонагрівальних установок

Досліджено завдання оптимізації каскадних сонячних водонагрівальних установок за усередненими теплотехнічними параметрами, наведено приклади такої оптимізації для двох- і трьохкаскадних установок.

Ключові слова: оптимізація, сонячні водонагрівальні установки, теплотехнічні параметри.

Dologlonyan A.V. Heating engineering optimization of cascade sun waterheater plants

The task of optimization of cascade sun heat water plants was investigated on averaged heating engineering parameters, examples of such optimization are made for two and three-cascade plants.

Keywords: optimization, sun heat water options, heating engineering parameters.