

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***ЭЛЕМЕНТЫ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ  
КАСКАДНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК**

*Решена задача оптимизации каскадных солнечных водонагревательных установок с использованием экономических параметров, приведены примеры такой оптимизации для двухкаскадных установок.*

**Ключевые слова:** оптимизация, солнечные водонагревательные установки, экономические 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.

В работе [1] была рассмотрена задача теплотехнической оптимизации каскадных солнечных водонагревательных установок (СВУ). Подобная оптимизация позволяет увеличить количество теплоты вырабатываемой СВУ, либо уменьшить потребную площадь солнечных коллекторов (СК) для выработки заданного количества тепла. Последнее, в свою очередь, позволяет снизить стоимость каскадной СВУ по сравнению с обычной. Поскольку в каскадной СВУ используется несколько типов СК (количество типов равно количеству каскадов) и стоимость их неодинакова, то результаты технико-экономической оптимизации не будут совпадать с результатами теплотехнической.

*Цель исследований* – рассмотрение некоторых вопросов оптимизации стоимости двухкаскадной СВУ.

В [1] получены зависимости, позволяющие определить оптимальное, с теплотехнической точки зрения, соотношение площадей СК различных типов. Также было выявлено, что и сам общий размер потребной площади СК обоих типов зависит от этого соотношения. Поскольку стоимость различных типов СК различная, то для дальнейшего рассмотрения оптимизации стоимости двухкаскадной СВУ необходимо найти эту зависимость.

В соответствии с [1] температура на выходе из двухкаскадной СВУ определяется по формуле

$$t_o = t_i + (T_2 - t_i) - \left[ (T_2 - T_1) + (T_2 - t_i) e^{-NTU_1 z^*} \right] e^{-NTU_2 (1 - z^*)}, \quad (1)$$

где  $I$  — плотность потока суммарной солнечной радиации в плоскости СК, Вт/м<sup>2</sup>;  $A$  — общая площадь поверхности СК, м<sup>2</sup>;  $t_o$  — температура на выходе из СК СВУ, °С;  $t_i$  — температура воды на входе в СК СВУ, °С;  $F'U_L$  — произведение коэффициента эффективности поглощающей панели на коэффициент тепловых потерь СК, Вт/(м<sup>2</sup> 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;  $T_1 = t_a + \frac{(F'\eta_0)_1}{(F'U_L)_1} I$ , °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);  $z^* = \frac{A_1}{A}$ , где  $A_1$  — площадь неостекленных СК;  $A_2$  — площадь остекленных СК.

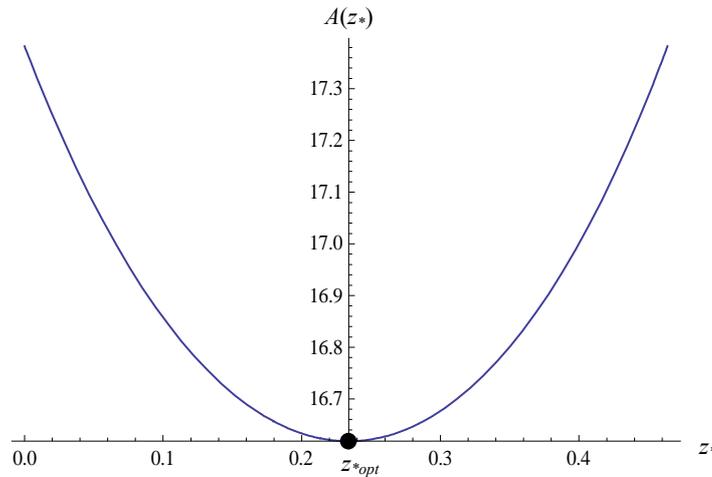
Проведя ряд несложных алгебраических преобразований, приведем (1) к следующему виду

$$A = \frac{Gc_p}{(F'U_L)_2} \frac{1}{1 - z^*} \ln \frac{1 - \theta_{12} + \theta_{12} \exp(-NTU_2 KU_{12} z^*)}{1 - \eta_{12}}, \quad (2)$$

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

Так как  $NTU_2$  зависит от  $A$ , то уравнение (2) является трансцендентным, и решить его можно только численно.

Пример такого решения изображен на рисунке 1.



$$\bar{t}_a = 21,6, \text{ } ^\circ\text{C}; \bar{I} = 577, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \text{ (характерно для Крыма); } (F'U_L)_1 = 20, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}); (F'\eta_0)_1 = 0,92;$$

$$(F'U_L)_2 = 6, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}); (F'\eta_0)_2 = 0,75; t_i = 15 \text{ } ^\circ\text{C}; G = 0,035 \text{ кг/с}; c_p = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг К})$$

Рисунок 1 — Пример численного решения (2) для условий Крыма в июне

Стоимость СВУ, чаще всего, прямо пропорциональна площади солнечных коллекторов [2], но учитывая, что в двухкаскадной установке присутствуют два типа СК с различной стоимостью, то стоимость СВУ будет равна

$$C_{СВУ} = A(z^*) [C_{СК1}z^* + C_{СК2}(1 - z^*)], \tag{3}$$

где  $C_{СК1}, C_{СК2}$  — удельные стоимости СВУ с различными типами СК, д.е./м<sup>2</sup>.

Обычно, в первом каскаде СВУ применяют дешевые — неостекленные СК, которые обладают более высокими оптическими характеристиками, но имеют более высокие тепловые потери.

Рисунок 1 иллюстрирует, что отклонение  $z^*$  в любую сторону от  $z^*_{opt}$  однозначно приведет к увеличению общей площади СВУ. Если отклонение произойдет влево, то кроме увеличения общей площади произойдет увеличение доли дорогих остекленных СК, поэтому это направление для минимизации стоимости СВУ отпадает. Если отклонение произойдет вправо, то, несмотря на увеличение общей площади, произойдет уменьшение доли дорогих остекленных СК, поэтому при правильном выборе  $z^*$  можно добиться минимизации стоимости СВУ, это направление и будет использоваться.

Найти минимальную стоимость СВУ для заданных условий можно из уравнения (3), учитывая (2), пример такого численного решения изображен на рисунке 2.

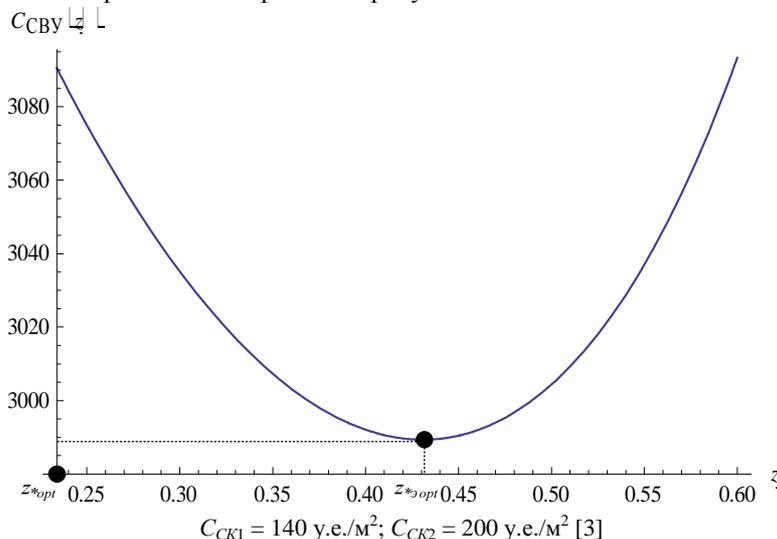


Рисунок 2 — Минимизация стоимости СВУ в соответствии с выражением (3)  
 $C_{СК1} = 140 \text{ у.е.}/\text{м}^2; C_{СК2} = 200 \text{ у.е.}/\text{м}^2$  [3]

Подобный подход позволяет снизить стоимость СВУ, получающуюся при теплотехнической оптимизации, на 3,5%, а по сравнению с обычной — однокаскадной СВУ на 16%.

Для упрощения вычислений можно аппроксимировать правую от  $z_{*opt}$  ветку  $A(z_*)$  (см. рисунок 1), например квадратным полиномом.

$$A(z_*) = c_0 + c_1(z_* - z_{*opt}) + c_2(z_* - z_{*opt})^2, \quad (4)$$

при условии, что

$$\begin{cases} A(z_{*opt}) = A_o; \\ \left. \frac{\partial A(z_*)}{\partial z_*} \right|_{z_* = z_{*opt}} = 0; \\ A(z_{*m}) = A_m. \end{cases} \quad (5)$$

В условиях (5)  $z_{*m}$  — максимально допустимая доля неостекленных СК; соответственно  $A_m$  — максимально допустимая общая площадь СК,  $m^2$ ;  $A_o$  — общая площадь СК при  $z_* = z_{*opt}$ .

В общем случае величина  $z_{*m}$  может быть любой в диапазоне  $z_{*opt} < z_{*m} < 1$ , но с технической точки зрения она четко определена, что иллюстрирует рисунок 3, где показано, что  $z_{*m}$  — это такое отношение площади неостекленных СК к общей площади СВУ при котором температура на выходе из первого каскада равнялась бы температуре на выходе из остекленных СК сравнимой площади при прочих равных условиях.

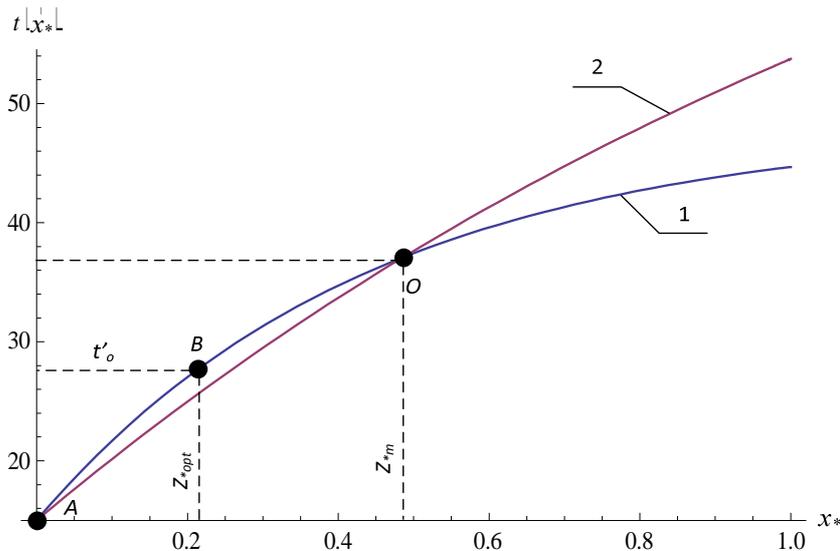


Рисунок 3 — Иллюстрация выбора  $z_{*m}$  :

1 — для СК без прозрачной изоляции; 2 — для СК с одним слоем прозрачной изоляции

Приведенные выше рассуждения можно выразить математически следующим образом [1]

$$t(z_{*m}) = t_i + \Delta T_1 (1 - e^{-NTU_1 z_{*m}}) = t_i + \Delta T_2 (1 - e^{-NTU_2 z_{*m}}).$$

Проведя алгебраические преобразования предыдущего выражения получим:

$$\theta_{12} = \frac{1 - \exp(-NTU_2 z_{*m})}{1 - \exp(-KU_{12} NTU_2 z_{*m})}. \quad (6)$$

Величину  $z_{*m}$  из (6) в явном виде получить невозможно, поэтому придется решать численно. При этом величина  $A_m$  легко находится аналитически [2]

$$A_m = -\frac{Gc_p}{(F'U_L)_2} \ln(1 - \eta_{i2}). \quad (7)$$

Принимая во внимание (5), (6) и (7) нетрудно получить коэффициенты  $c_i$  в (4). Опуская промежуточные преобразования, получим выражение аппроксимирующее правую от  $z_{*opt}$  ветку  $A(z_*)$  при условии  $z_{*opt} \leq z_* \leq z_{*m}$

$$A(z_*) = A_o + (A_m - A_o) \left( \frac{z_* - z_{*opt}}{z_{*m} - z_{*opt}} \right)^2. \quad (8)$$

Подставим (8) в (3) и найдем производную

$$\frac{\partial C_{CBY}(z_*)}{\partial z_*} = \frac{\partial A(z_*)}{\partial z_*} [C_{CK1}z_* + C_{CK2}(1-z_*)] - A(z_*)(C_{CK2} - C_{CK1}) = 0. \quad (9)$$

Решим (9) относительно  $z_*$ . Опуская промежуточные преобразования, получим выражение для  $z_{*эopt}$

$$z_{*эopt} = z_{*opt} + \frac{1}{3} \left[ \left( \frac{C_{CK2}}{C_{CK2} - C_{CK1}} - z_{*opt} \right) \pm \sqrt{\left( \frac{C_{CK2}}{C_{CK2} - C_{CK1}} - z_{*opt} \right)^2 - \frac{3A_o}{A_m - A_o} (z_{*m} - z_{*opt})^2} \right]. \quad (10)$$

В выражении (10) выбираем знак «минус» из соображения, что при  $C_{CK1} = C_{CK2}$  должно выполняться равенство  $z_{*эopt} = z_{*opt}$ . Таким образом, окончательно получаем:

$$z_{*эopt} = z_{*opt} + \frac{1}{3} \left[ \left( \frac{C_{CK2}}{C_{CK2} - C_{CK1}} - z_{*opt} \right) - \sqrt{\left( \frac{C_{CK2}}{C_{CK2} - C_{CK1}} - z_{*opt} \right)^2 - \frac{3A_o}{A_m - A_o} (z_{*m} - z_{*opt})^2} \right]. \quad (11)$$

Погрешность от использования приближенного расчета не велика, и, судя по рисунку 4, не превышает 0,1%. Практические расчеты показали, что предложенная методика работает при  $1 \leq \frac{C_{CK2}}{C_{CK1}} \leq 1,5$ . Если указанное неравенство не выполняется, то  $z_{*эopt}$  будет больше  $z_{*m}$ , что будет приводить к очень резкому увеличению общей площади СВУ поскольку возможности неостекленных СК сильно ограничены (см. рисунок 3), а это, в свою очередь, вызовет повышение затрат на техническое обслуживание и ремонт, и снизит надежность установки.

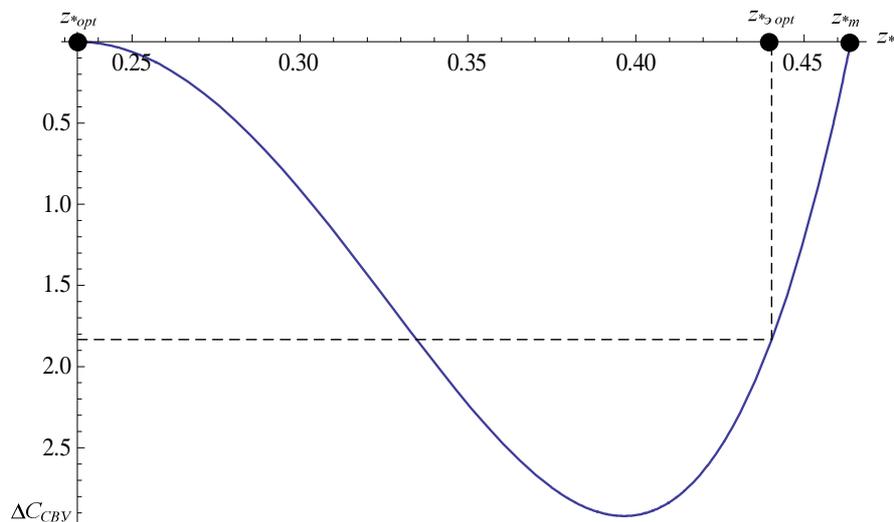


Рисунок 4 — Оценка погрешности при использовании приближенного метода определения  $z_{*эopt}$  и  $C_{CBY}$

Таким образом, данная работа определила дополнительные возможности оптимизации каскадных СВУ с учетом некоторых экономических показателей. Задача оптимизации СВУ должна быть продолжена с использованием технико-экономических критериев эффективности.

**Библиографический список использованной литературы**

1. Дологлонян А.В. Теплотехническая оптимизация каскадных солнечных водонагревательных установок / А.В. Дологлонян // Вестник СевНТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. — Севастополь: СевНТУ, 2012. — Вып. 133. — С. 361–369.
2. Даффи Дж.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Дж. А. Даффи, У.А. Бекман. — М.: Мир, 1977 — 306 с.
3. Бутузов В.А. Анализ энергетических и экономических показателей гелиоустановок горячего водоснабжения / В.А. Бутузов // Промышленная энергетика. — 2001. — № 10.

*Поступила в редакцию 28.05.2013 г.*

**Дологлонян А.В. Елементи техніко-економічної оптимізації каскадних сонячних водонагрівальних установок**

Досліджено завдання оптимізації каскадних сонячних водонагрівальних установок с використанням економічних параметрів, наведені приклади такої оптимізації для двохкаскадних установок.

**Ключові слова:** оптимізація, сонячні водонагрівальні установки, економічні параметри.

**Dologlonyan A.V. Elements of technical and economic optimization of the cascade solar water-heating installations**

The problem of optimization of the cascade solar water-heating installations is investigated by use of economic parameters, instances of such optimizations for the two-cascade installations are resulted.

**Keywords:** optimization, solar water-heating installations, economic parameters.