

# УТОЧНЁННАЯ МЕТОДИКА РАСЧЁТА РЕЖИМОВ РАБОТЫ СОЛНЕЧНЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ ВОДЫ ЁМКОСТНОГО ТИПА

Ермуратский Василий, Ермуратский Владимир (Институт энергетики АН Молдовы),  
Ермуратский П. (Московская государственная академия тонких химических технологий  
им. М.В. Ломоносова г. Москва)

**Аннотация.** Представлена уточнённая методика расчёта тепловых режимов солнечных нагревателей воды ёмкостного типа, основанная на использовании электротепловой схемы замещения и метода узловых потенциалов.

**Ключевые слова:** солнечные нагреватели воды, электротепловая схема замещения, солнечное излучение.

## METODA PRECISĂ DE CALCUL AL REGIMULUI DE FUNCȚIONARE ALE ÎNCĂLZITOARILOR SOLARI DE APĂ DE TIP CAPACITATEA

Ermuratski Vasili, Ermuratschii Vladimir (Institutul de Energetică al Academiei de Științe), Ermuratski P. (Academia de stat a tehnologiilor chimice fine M.V. Lomonosov din Moscova)

**Rezumat.** Este prezentată metoda precisă de calculul a regimurilor termice a încălzitoarelor solare de apă de tip capacitativ bazată pe utilizarea schemei termoelectrice echivalente și metoda nodurilor de potențial.

**Cuvinte cheie:** încălzitor solar de apă, schema termoelectrică echivalentă, iradierea solara.

## REFINED METHOD OF COMPUTING MODES OF OPERATING OF CAPACITY-TYPE SOLAR HEATERS OF WATER

Ermuratski Vasili, Ermuratski Vladimir (Institute of Power Engineering, Academy of Sciences of Moldova, Kishinev), Ermuratski P. (M.V. Lomonosov Moscow state academy of fine chemical technology, Moscow)

**Abstract.** The refined method procedure of thermal modes of solar heaters of water of the capacity type, based on use of an electro-thermal equivalent circuit and a method of central potentials is presented.

**Keywords:** solar heaters of water, electro-thermal equivalent circuit, solar radiation

**Объект.** Рассматривается солнечный нагреватель воды (СНВ), в котором конструктивно совмещены солнечный коллектор и аккумулятор горячей воды. Такие СНВ перспективны не только для индивидуальных установок [1,2], но и для достаточно крупных систем горячего водоснабжения [3]. Вместе с тем, применение традиционных методик расчёта температур, производительности, полезной энергии, изложенных в вышеуказанных работах, приводит к погрешностям, которые обусловлены неточным заданием параметров и особенностью теплообмена таких СНВ с окружающей средой. Так, при горизонтальном расположении абсорбера могут существенно увеличиться радиационные потери в атмосферу и уменьшиться радиационный теплообмен с окружающими предметами. Кроме того, в отличие, например от гелиоустановок с разделёнными элементами, СНВ рассматриваемого вида, по-другому реагируют на переменный режим облучения, связанный с затенением при переменной облачности. Возможны разные варианты конструктивного исполнения прозрачного ограждения (число слоёв, вид материала, его толщина и т.д.) и абсорбера СНВ (селективность, форма). Характеристики СНВ могут сильно зависеть от наличия экранов-рефлекторов и их углов

наклона. В связи с этими особенностями возникает необходимость в уточнении существующих методик расчёта температурных режимов СНВ ёмкостного типа.

### Методика расчёта температурного режима СНВ

Примем следующие упрощающие допущения: температурное поле СНВ одномерное, температура воды равна температуре абсорбера, потребление горячей воды из СНВ осуществляется во второй половине дня по завершению процесса нагрева.

Для расчётов энергетических показателей и характеристик солнечного нагревателя воды ёмкостного типа применена электротепловая схема замещения, показанная на рис.1. На этом рисунке  $C$  - это теплоёмкость рабочего тела; резисторы  $Y_1 - Y_5$  - тепловые проводимости;  $S_1, S_2$  - источники тепла (поглощаемая прозрачным ограждением и абсорбером солнечная энергия);  $T_a$  - температура окружающей среды;  $T_{ae}$  - эквивалентная температура атмосферы. Значения этих величин зависят от конструкции, геометрических размеров нагревателя, а также от условий его работы [1,2].

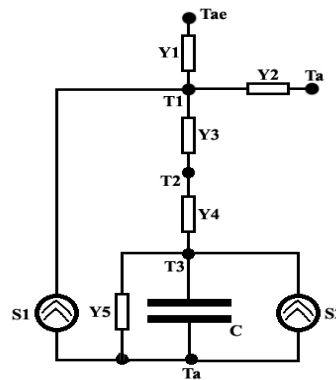


Рис.1 Электротепловая схема замещения СНВ ёмкостного типа.

Температуры  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  в узлах схемы замещения соответствуют точкам, расположенных на внешней и внутренней поверхности прозрачного ограждения, а также в воде.

Теплоёмкость рабочего тела солнечного нагревателя воды определяется по известному выражению:

$$C = \rho V C_y, \quad (1)$$

где  $\rho$ ,  $V$ ,  $C_y$  - плотность, объём и удельная теплоёмкость воды.

Тепловые проводимости  $Y_1 - Y_5$  рассчитываются для каждого элемента конструкции СНВ, используя данные по определению удельных коэффициентов конвективного, кондуктивного и радиационного теплообмена, теплоотдачи, приведенные в работах [1,4,5] и в других источниках, соответствующие конструктивным особенностям и ориентации СНВ. Так, например радиационная тепловая проводимость  $Y_1$  (между внешней поверхностью прозрачного ограждения и атмосферой), учитывая небольшое отличие абсолютных температур  $T_{ae}$  и  $T_1$ , рассчитывается по следующей формуле [4]:

$$Y_1 = \varepsilon\varphi F[0.005(T_1 + T_{ae})]^3, \quad (2)$$

где  $\varepsilon, \varphi$  – эквивалентная степень черноты и угловой коэффициент этой пары;  $T_{ae}$  – эквивалентное значение абсолютной температуры атмосферы;  $F$  – апертура СНВ. Особенностью здесь является то, что  $\varepsilon, \varphi$  и эквивалентная температура атмосферы должны определяться для условий с различной влажностью воздуха, индекса и характера облачности [1].

Проводимость  $Y_2$  равна сумме двух проводимостей, определяемых для вышеуказанной поверхности по формулам конвективного и радиационного теплообмена с окружающей средой. При этом радиационная компонента находится по формуле (2), используя соответствующие значения коэффициентов и температур. Для расчётов конвективной компоненты применялась следующая формула [4]:

$$Y_c = F[A(V)^m + B] \quad (3)$$

где  $A, B, m$  – коэффициенты, зависящие от размеров поверхности, температур и режима движения воздуха;  $V$  – скорость ветра.

Аналогично рассчитываются остальные тепловые проводимости схемы замещения. При правильно найденных параметрах считаем эту схему эквивалентной по отношению к объекту. Значения тепловых проводимостей электротепловой схемы замещения зависят от температур отдельных частей СНВ и поэтому должны рассчитываться одновременно с расчётом теплового режима.

Основная сложность обеспечения результатов расчётов близких к реальным связана с моделированием метеорологических данных. Обычной практикой является формирование условий «типичного метеорологического года» (ТМГ [1]).

Интенсивность падающего на некоторую поверхность прямого солнечного излучения зависит от ориентации этой поверхности, месяца года, времени суток и степени прозрачности атмосферы [1]. Для поверхности перпендикулярной лучам эту величину предлагается рассчитывать по следующей формуле:

$$I = 1353K_1 K_2 \exp(-0.41M_a), \quad (4)$$

где  $K_1, K_2$  – индексы, учитывающие прозрачность атмосферы и характеристики облачности. Значение условной массы атмосферы определялась по следующему выражению:

$$M_a = 1/(0.96 \cos(\theta_z) + 0.05) \quad (5)$$

Координаты Солнца на небосводе (зенитный угол Солнца ( $\theta_z$  и азимут), а также плотность солнечного излучения, падающего на прозрачное ограждение СНВ рассчитываются по формулам, приведенным в работах [1,2].

Мощность источников  $S_1, S_2$  рассчитывается в соответствии с рекомендациям работы [1], определяя пропускательную способность прозрачного ограждения как функцию угла падения солнечных лучей, а также приведенную поглощательную способность абсорбера.

Аппроксимация дневного хода температуры окружающей среды до момента начала её снижения осуществлялась экспоненциальной функцией следующего вида:

$$t_a[\tau] = t_0[N_m] + (t_m[N_m] - t_0[N_m])(1 - \exp(-\tau/B[N_m])) \quad (6)$$

где  $N_m$  – номер месяца года;  $t_0[N_m]$  – начальное значение температуры воздуха;  $t_m[N_m]$  – максимальное суточное значение температуры;  $B[N_m]$  – постоянная времени экспоненты суточного хода температуры. После момента начала снижения температуры воздуха ( $\tau_1$ ) выражение для её расчета имеет вид:

$$t_a[\tau] = t_a[\tau_1] \exp(-\tau/B_1[N_m]) \quad (7)$$

Значения параметров в формулах (6) и (7) определяются по данным метеорологических наблюдений, приведенных, например, в работах [6,7].

Мощность потерь энергии определялась как сумма потоков теплообмена СНВ с окружающей средой:

$$\Delta Q = Y_1(T_1 - T_{ae}) + Y_2(T_1 - T_a) + Y_5(T_3 - T_a) \quad (8)$$

Расчёт температур в узлах электротепловой схемы замещения (Рис.1) производится, используя метод узловых потенциалов, известный из электротехники [8]. Для того чтобы не решать систему уравнений, описывающую нестационарный тепловой процесс, связанный с учётом теплоёмкости воды, был применён следующий подход.

Интервал времени, в течение которого поглощается солнечная энергия, разбивается на ряд интервалов. Расчёт выполняется, начиная с первого интервала для которого известно начальное значение температуры воды, которое принято зависящим от месяца года или вида источника воды водопровод или, например, колодец. Система уравнений для узловых потенциалов решается как для стационарного процесса при задаваемой температуре воды ( $T_3$ ), т.е. для схемы, показанной на Рис.1, составляется не три уравнения, а два. Температура воды на каждом интервале времени находится поисковым методом, в котором параметр поиска определяется из уравнения небаланса потоков тепла для схемы замещения:

$$D = S_1 + S_2 - (PP_1 + PP_2 + PP_3) - Q_3, \quad (9)$$

где  $PP_1, PP_2, PP_3$  – потоки тепла через проводимости  $Y_1, Y_2, Y_3$  (Рис.1).

Поток тепла, нагревающего воду, рассчитывается по формуле изменения внутренней энергии массы воды:

$$Q_3 = mc\Delta T_3 / \Delta \tau, \quad (10)$$

где  $\Delta T_3$  - изменение температуры воды за интервал времени  $\Delta \tau$ . Поисковый процесс производится на каждом интервале времени. При этом в качестве начального значения температуры воды для следующего интервала времени используется значение этой величины, полученное на предыдущем интервале времени.

Для расчётов температур в различных точках конструкции СНВ ёмкостного типа по вышеприведенным формулам была разработана специальная программа (среда Дельфи, язык - Паскаль). Рассчитываются также значения таких величин, как полезная мощность и энергия, потери тепла и КПД СНВ на различных интервалах времени суток, месяцев и года.

### Результаты математических и физических экспериментов

Для оценки применимости предложенной методики расчёта были выполнены измерения и расчёты температуры воды двух конструкций: СНВ1 (без корпуса и

теплоизоляции) и теплоизолированного СНВ2 с полимерными абсорберами при  $100\text{л/м}^2$ . На рис.2 и рис.3 приведены результаты экспериментов, проведенных в условиях ясных солнечных дней августа 2005.

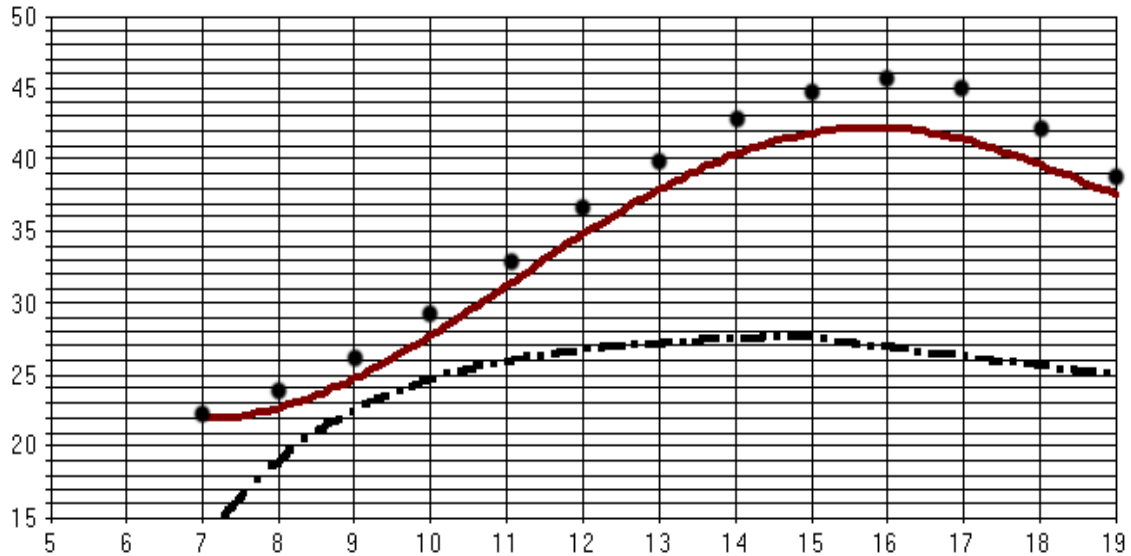


Рис.2 Зависимости температуры воды и воздуха от времени суток для СНВ1

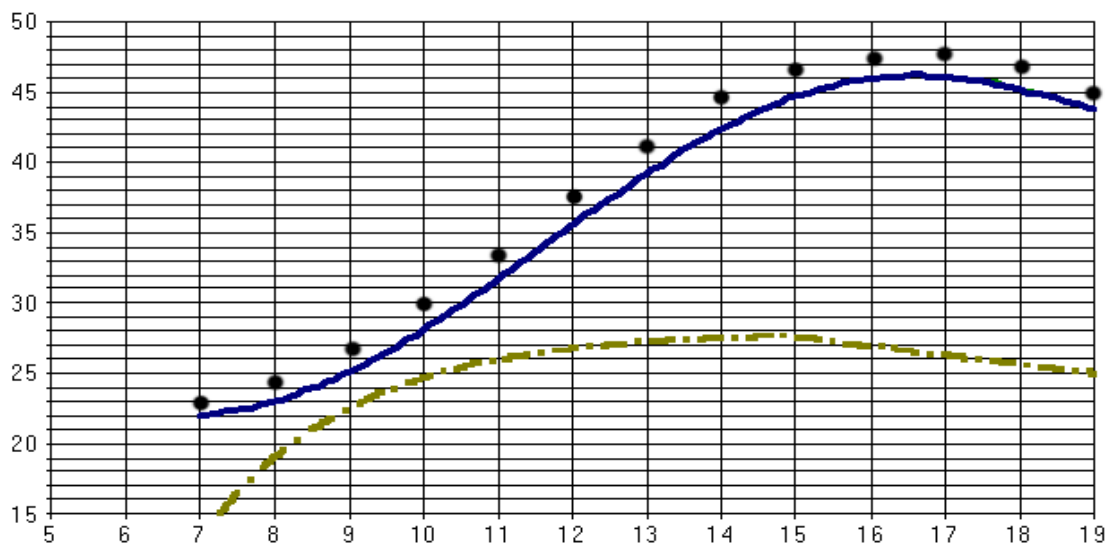


Рис.3 Зависимости температуры воды и воздуха от времени суток для СНВ2 с корпусом и теплоизоляцией с полимерным абсорбером и однослойным стеклянным ограждением

Из данных этих экспериментов следует достаточно хорошее совпадение временных зависимостей температуры воды. Систематическое расхождение данных физических и численных экспериментов вероятнее всего обусловлено неточностью определения эквивалентной температуры атмосферы, которая при расчётах была равна  $-7^{\circ}\text{C}$ . Полное совпадение результатов численных и физических экспериментов имеет место при  $t_{\text{ae}} = 0^{\circ}\text{C}$ . На рисунках также видно, что максимальные температуры воды в этих двух

конструкциях отличаются и экстремум наблюдается в разное время. В это время целесообразно производить отбор горячей воды или же теплоизолировать прозрачное ограждение СНВ для более позднего отбора.

### **Заключение.**

Разработана уточнённая методика расчёта тепловых режимов работы солнечных нагревателей воды ёмкостного типа, основанная на использовании электротепловой схемы замещения и метода узловых потенциалов. Методика позволяет учесть различные механизмы и условия теплообмена СНВ с окружающей средой, а также вариации солнечного излучения и температуры этой среды. Необходимо разработать более точный способ определения эквивалентной температуры атмосферы, учитывающий, в частности, влагосодержание воздуха, индекс облачности и её характер.

### **Литература**

1. Duffie J.F., Beckman W.A.. Solar engineering of Thermal Processes. Second Edition. N-Y., 1991. John Willy & Sons.
2. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки. М.: Энергоатомиздат, 1991.
3. Tsilingiris P.T. Design, analysis and performance of low-cost plastic film large solar water heating systems. Solar Energy 60, 5,(1997) 245-256.
4. Дульнев Г.Н., Семяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л. Энергия,- 1968, - 359с.
5. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Изд.4. М. Энергоиздат. 1981. 417с.
6. Климат Кишинёва / Под ред. В.Н. Бабиченко, Т.Г. Шевкун/ – Л., Гидрометеиздат, 1982
7. Лассе Г.Ф. Климат Молдавской ССР Л.Гидрометеиздат. 1978.
8. Основы теории цепей /Г.В.Зевеке, П.А.Ионкин, А.В.Нетушил и др.-М.:Энергия, 1975.

#### **Авторы:**

Ермуратский Владимир Васильевич- доктор-хабилитат технических наук, заведующий лабораторией нетрадиционных источников энергии Института энергетики АНМ. Научные интересы связаны с исследованиями в области возобновляемых источников энергии и энергосбережения. Занимается разработкой и исследованиями низкотемпературных солнечных тепловых установок и устройств на их основе. [ermuratskie@gmail.com](mailto:ermuratskie@gmail.com)

Ермуратский Василий Владимирович -инженер лаборатории управляемого электропривода Института энергетики АН РМ. Научные интересы связаны с разработкой методов и программ моделирования процессов в технических устройствах и системах.

Ермуратский Пётр Васильевич - доктор-хабилитат технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники, электроники, микропроцессорной техники им. А.В.Нетушила, Московская государственная академия тонкой химической технологии им. М. В. Ломоносова Научные интересы связаны с исследованиями в области планирования экспериментов и моделирования процессов в нелинейных электрических цепях.