

УДК 662.997

Сиворакша В.Е., Марков В.Л., Петров Б.Е.

### КОМБИНИРОВАННАЯ ТЕПЛОЗАЩИТА СЕЗОННЫХ ТЕПЛОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

При круглогодичном использовании солнечных систем для теплоснабжения промышленных, сельскохозяйственных и жилищно-коммунальных потребителей из-за неравномерности поступления солнечной энергии возникает потребность в сезонных аккумуляторах теплоты. Накопление и хранение теплоты неразрывно связано с ее потерями в окружающую среду. Пассивная теплозащита – покрытие стенок теплового аккумулятора (ТА) теплоизолирующим материалом – значительно снижает эти потери и успешно используется при кратковременном хранении теплоты в небольших ТА. В сезонных аккумуляторах теплоты большой емкости утечки тепла при такой теплозащите составляют существенную долю получаемой солнечной энергии. Например, по данным [1] солнечный дом в Копенгагене имеет подземный бак-теплоаккумулятор объемом  $V_a = 30 \text{ м}^3$ , теплоизолированный слоем минеральной ваты  $\delta_{из} = 0,6 \text{ м}$ . Годовая теплопроизводительность установки равна  $9017 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{год}$ , а потери теплоты из ТА –  $3697 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{год}$ , что составляет 41 % от полученной теплоты.

В настоящей работе рассматривается комбинированная теплозащита, при наличии которой часть теряемой теплоты возвращается в тепловой аккумулятор. Для достижения этого необходимо (рис. 1а) в теплоизолирующем слое поместить теплособирающий коллектор (ТСК) 4, по каналам которого циркулирует охлаждающая вода. Он может представлять собой металлический лист, к которому с шагом  $2b$  приварены трубы. Воспринятую в коллекторе теплоту вода в специальной емкости 9 передает хладагенту теплового насоса (ТН). Во время работы ТН в конденсаторе 6 эта теплота и теплота, эквивалентная работе, затраченной на привод компрессора 8, возвращаются в тепловой аккумулятор 1. Чтобы абстрагироваться от конкретных размеров и конфигураций ТА, рассматриваются удельные тепловые потери через теплоизоляцию, которая в общем случае может быть многослойной. На рис. 1а показаны два слоя: позиция 3 – первый слой и позиция 5 – второй слой теплоизоляции.

Когда тепловой насос не работает (пассивная теплозащита), удельные тепловые потери в стационарных условиях можно определить как

$$q_{нас} = \frac{t_a - t_n}{R_{\Sigma}}, \quad (1)$$

где  $R_{\Sigma} = \frac{1}{\alpha_a} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_n}$ .

Как показывают расчеты,  $\frac{1}{\alpha_a} + \frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_{\bar{n}\bar{o}}}{\lambda_{\bar{n}\bar{o}}} \ll \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}$ .

Тогда можно считать, что  $R_{\Sigma} \approx \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} = R_1 + R_2$ .

Характер изменения температуры по толщине слоя теплоизоляции при неработающем тепловом насосе показан на рис. 1б пунктирными линиями. Температура листа ТСК в этом случае равна

$$t_{лн} = \frac{R_2 \cdot t_a + R_1 \cdot t_n}{R_{\Sigma}} \quad (2)$$

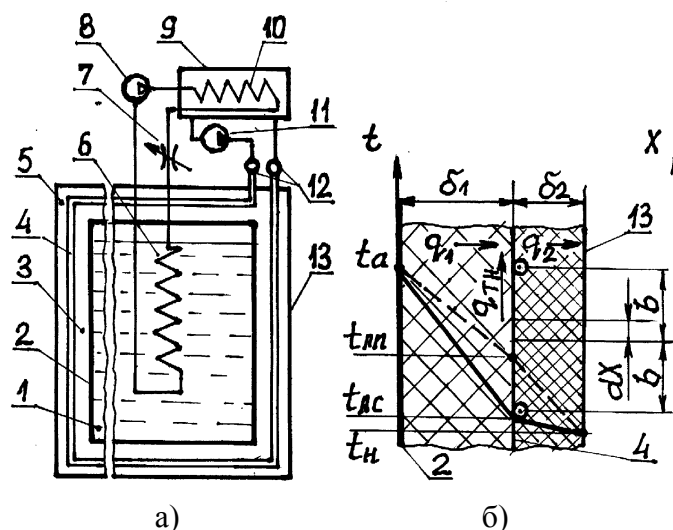


Рисунок 1 – Принципиальная схема теплозащиты ТА (а) и характер распределения температуры в теплозащитном слое (б):  
 1 – емкость ТА; 2 – силовая стенка; 3 – первый слой теплоизоляции; 4 – теплособирающий коллектор; 5 – второй слой теплоизоляции; 6 – конденсатор ТН; 7 – дроссель ТН; 8 – компрессор ТН; 9 – емкость охлаждающей воды; 10 – испаритель ТН; 11 – насос; 12 – распределительные коллекторы; 13 – наружная оболочка ТА

Когда тепловой насос работает, то  $q_1 = q_{ТН} + q_2$ . Характер стационарного распределения температуры в слое изоляции показан на Рис. 1б сплошной линией. Значения тепловых потоков  $q_1$  и  $q_2$  зависят от температуры  $t_n$  листа ТСК, которая изменяется вдоль оси  $X$ . Для выявления характера изменения  $t_n(X)$  рассматривается уравнение баланса теплоты для элементарного участка  $dX$  при стационарном режиме [2]:

$$-\lambda_n \cdot \delta_n \frac{d^2 t_n(X)}{dX^2} = \frac{t_a - t_n(X)}{R_1} - \frac{t_n(X) - t_n}{R_2} \quad (3)$$

Решение этого уравнения совместно с граничными условиями – при  $X=0$   $\frac{dt_n(0)}{dX} = 0$  и при  $X = b$   $t_n(b) = t_{лн}$  – имеет вид:

$$t_n(X) = t_{лн} - (t_{лн} - t_n) \frac{ch(m_n \cdot X)}{ch(m_n \cdot b)} \quad (4)$$

где  $m_l = \sqrt{\frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2 \cdot \delta_l \cdot \lambda_l}}$ .

Среднеинтегральная температура листа ТСК

$$t_{лс} = t_{лм} - (t_{лм} - t_{лк}) \cdot \eta_l, \quad (5)$$

где  $\eta_l = \frac{th(m_l \cdot b)}{m_l \cdot b}$ .

Аналогично определяется [3,4] среднеинтегральная температура стенки канала:

$$t_{кс} = t_b + (t_{лк} - t_b) \cdot \eta_k, \quad (6)$$

где  $\eta_k = \frac{th(m_k \cdot D_k/2)}{m_k \cdot D_k/2}$ ;  $m_k = \sqrt{\frac{\alpha_6}{\lambda_k \cdot \delta_k}}$ .

Для выявления связи между температурой  $t_{лк}$  в месте стыка листа и канала и температурой  $t_6$  воды, протекающей в канале, рассматривается уравнение баланса теплоты:

$$\alpha_6 \cdot (t_{кс} - t_6) \cdot \pi \cdot D_k/2 = -\lambda_l \cdot \delta_l \cdot \frac{dt_l(b)}{dX} \text{ при } X = b. \quad (7)$$

При установившемся ламинарном течении воды в канале можно полагать  $Nu \approx 4$  или  $\alpha_6 = 4 \cdot \frac{\lambda_6}{D_k}$  [2].

Решение уравнения (7) относительно температуры листа в месте контакта с учетом (4) имеет вид:

$$t_{лк} = \frac{A \cdot t_b + B \cdot t_{лм}}{A + B}, \quad (8)$$

где  $A = 2 \cdot \pi \cdot \lambda_6 \cdot \eta_k$ ;  $B = \delta_l \cdot \lambda_l \cdot m_l \cdot th(m_l \cdot b)$ .

Это позволяет установить связь между среднеинтегральной температурой листа ТСК и температурой воды, протекающей в коллекторе:

$$t_{лс} = t_{лм} - (t_{лм} - t_6) \cdot \eta_l \cdot \frac{A}{A + B}. \quad (9)$$

Удельные тепловые потоки при этом будут равны:  
– из теплового аккумулятора

$$q_1 = \frac{t_a - t_{лс}}{R_1};$$

– в окружающую среду:  $q_2 = \frac{t_{лс} - t_n}{R_2}$ ;

– отбираемый тепловым насосом:  $q_{ТН} = q_1 - q_2 = \frac{t_a - t_{лс}}{R_1} - \frac{t_{лс} - t_n}{R_2}$ ;

– отдаваемый в тепловой аккумулятор:  $q_a = q_{ТН} + w$ .

В том случае, когда  $w = q_2$ , возвращаемая в тепловой аккумулятор теплота будет равна теряемой через стенки теплоте  $q_1$  и температура в ТА с течением времени не должна изменяться.

Энергетическую эффективность комбинированной теплозащиты можно оценить с помощью коэффициента  $K_э$ . Он показывает, во сколько раз тепловые потери при пассивной защите больше тепловых утечек в окружающее пространство при комбинированной теплозащите:

$$K_э = \frac{q_{пас}}{q_2} = \frac{t_a - t_n}{t_{лс} - t_n} \cdot \frac{R_2}{R_э}$$

Для выявления характера влияния отдельных факторов на эффективность работы комбинированной теплозащиты выполнены расчеты удельных тепловых потерь для подземного теплового аккумулятора, стенки которого из армированного бетона ( $\delta_{ст} = 0,8$  м) теплоизолированы ячеистым бетоном ( $\delta_{из} = 0,8$  м). Результаты расчетов представлены на рис. 2. Их анализ показывает, что потери тепла в окружающее пространство при комбинированной теплозащите могут быть снижены в несколько раз. На величину коэффициента  $K_э$  существенно влияют тепловая проводимость ( $\delta_l \cdot \lambda_l$ ) листа ТСК, шаг между каналами  $2b$  и глубина размещения ТСК в теплоизолированном слое  $\delta_2$ . Окончательный же выбор параметров комбинированной теплозащиты должен основываться на результатах технико-экономического расчета.

#### Условные обозначения

$V$  – объем;  $\delta$  – толщина слоя;  $q$  – удельный тепловой поток;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $t$  – температура;  $R$  – термическое сопротивление;  $b$  – половина шага между каналами;  $D$  – диаметр;  $w$  – мощность компрессора, отнесенная к площади теплоотдающей поверхности ТА;  $K_э$  – коэффициент тепловой эффективности;  $Nu = \alpha \cdot D / \lambda$  – критерий Нуссельта.

#### Индексы

$a$  – аккумулятор;  $в$  – вода;  $из$  – изоляция;  $к$  – канал;  $кс$  – канал средний;  $л$  – лист;  $лк$  – лист, канал;  $лп$  – лист, пассивный;  $лс$  – лист, средний;  $н$  – наружный;  $пас$  – пассивный;  $ст$  – силовая стенка;  $ТН$  – тепловой насос;  $\Sigma$  – суммарный; 1 – первый слой теплоизоляции; 2 – второй слой теплоизоляции.

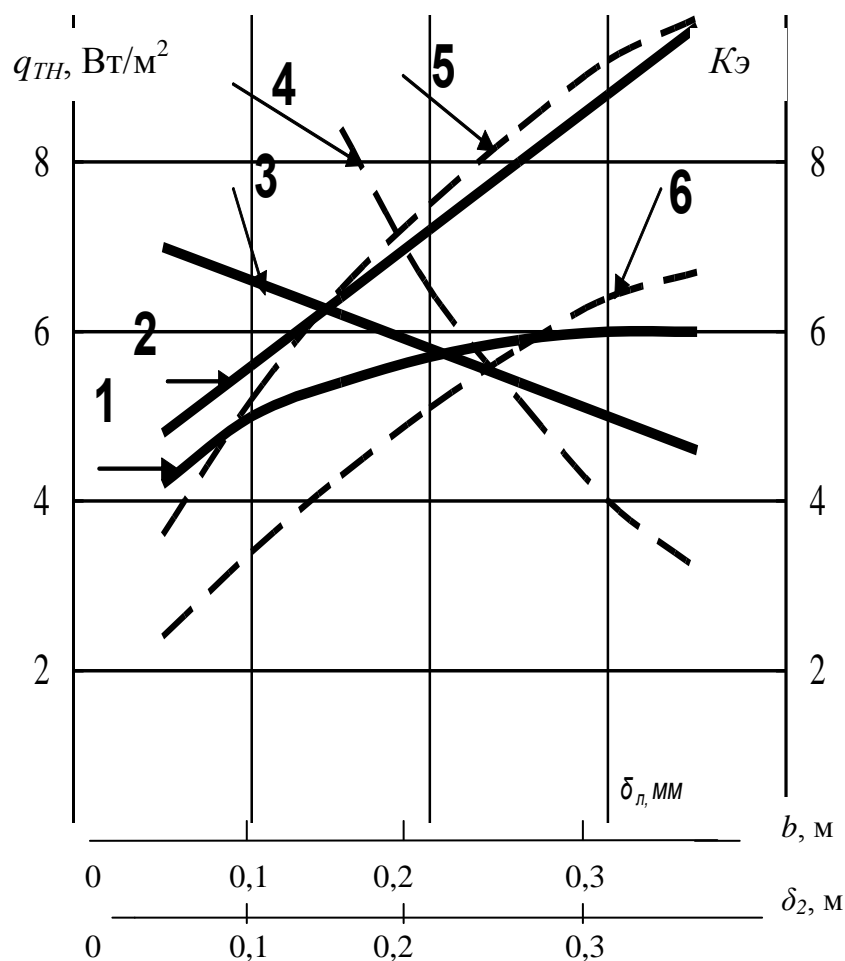


Рисунок 2 – Влияние конструктивных факторов на значение удельного теплового потока и коэффициента тепловой эффективности:  
 1 –  $q_{TH}(\delta_n)$ ; 2 –  $q_{TH}(\delta_2)$ ; 3 –  $q_{TH}(b)$ ; 4 –  $K_3(b)$ ; 5 –  $K_3(\delta_2)$ ; 6 –  $K_3(\delta_n)$

#### Литература

1. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки.–М.: Энергоиздат, 1991.–208 с.
2. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи.–М: Энергия, 1973.–320 с.
3. Сиворакша В.Ю., Марков В.Л., Петров Б.Є. та ін. Моногр.–Д.:Вид-во Дніпропетр. ун-ту, 2003.–132 с.
4. Влияние конструкции теплоспринимающего элемента на эффективность работы гелиоколлектора /В.Е. Сиворакша, В.Л. Марков, Б.Е. Петров, К.Е. Золотько // Экотехнологии и ресурсосбережение: журнал, №2–К., 2001.– С. 70...73.

УДК 662.997

Сиворакша В.Ю., Марков В.Л., Петров Б.Є.

### КОМБІНОВАНИЙ ТЕПЛОЗАХИСТ СЕЗОННИХ ТЕПЛОВИХ АКУМУЛЯТОРІВ

Розглядається комбінований теплозахист сезонних теплових акумуляторів, який складається з шару теплоізоляції, тепловбираючого колектора та теплового насоса. Пропонується метод визначення питомих теплових втрат і оцінки коефіцієнта ефективності комбінованого теплозахисту.