

УДК 662.997

Сиворакша В.Е., Марков В.Л.

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОДДЕРЖАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТЕПЛОВЫХ АККУМУЛЯТОРАХ

В теплотехнических системах с неравномерным поступлением или расходом энергии всегда имеются тепловые аккумуляторы (ТА), которые позволяют накапливать, хранить и выдавать тепловую энергию в соответствии с требованиями потребителя. В литературе [1, 2] много внимания уделено принципам накопления и хранения теплоты в тепловых аккумуляторах, но вопросы экономически выгодной их теплозащиты остались не рассмотренными. В работе [3] сделана попытка оценить возможности использования теплового насоса для компенсации тепловых потерь из ТА, но экономическая сторона этого вопроса осталась не затронутой.

Авторы предлагают для сравнения различных способов теплозащиты, обеспечивающей температуру в ТА неизменной, использовать приведенные годовые затраты C_{OC} на создание этой защиты, которые могут быть записаны следующим образом:

$$C_{\text{OC}} = C_{\text{e}} + C_{\text{y}} + C_{\text{f}} . \quad (1)$$

Здесь

$$C_{\text{e}} = (\varepsilon + \sigma)_{\text{e}} \cdot V_{\text{e}} \cdot \ddot{O}_{\text{e}} ,$$

$$C_{\text{y}} = Q_{\text{ynod}} \cdot n \cdot \delta \cdot \ddot{O}_{\text{y}} ,$$

$$C_{\text{f}} = (\varepsilon + \sigma)_{\text{f}} \cdot \frac{Q_{\text{ynod}}}{\tau_{\text{f}}} \cdot \ddot{O}_{\text{f}} .$$

Величина V_{e} вычисляется как

$$V_{\text{e}} = \frac{F_{\text{no}} + F_{\text{e}}}{2} \cdot \delta_{\text{e}} = F_{\text{O}} \cdot \delta_{\text{e}} , \text{ м}^3 . \quad (2)$$

Суточный расход энергии Q_{ynod} определяется суточными потерями теплоты.

При использовании для компенсации тепловых потерь термоэлектронагревателей (ТЭН)

$$Q_{\text{ynod}} = \frac{Q_{\text{axod}}}{\eta_{\text{f}}} = \frac{0,024}{\eta_{\text{f}}} \cdot \lambda_{\text{e}} \cdot (\dot{O}_{\text{a}} - \dot{O}_{\text{e}}) \cdot \frac{F_{\text{O}}}{\delta_{\text{e}}} , \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{сутки} . \quad (3)$$

В том случае, когда с этой целью применяется тепловой насос (ТН), воспринимающий тепло из окружающей среды,

$$Q_{y\dot{\rho}\dot{\rho}} = \frac{Q_{\dot{\rho}\dot{\rho}}}{\varphi_e} = \frac{0,024}{\varphi_{\dot{a}}} \cdot \lambda_{\dot{e}} \cdot (\dot{O}_{\dot{O}\dot{A}} - \dot{O}_{\dot{i}\dot{e}\dot{\delta}}) \cdot \frac{F_{\dot{O}}}{\delta_{\dot{e}}}, \text{ кВт}\cdot\text{ч/сутки}, \quad (4)$$

$$\text{где } \varphi_e = \frac{(\dot{O}_{\dot{O}\dot{A}} + \Delta\dot{O}_{\dot{E}}) \cdot \alpha}{(\dot{O}_{\dot{O}\dot{A}} + \Delta\dot{O}_{\dot{E}}) - (\dot{O}_{\dot{i}\dot{e}\dot{\delta}} - \Delta\dot{O}_{\dot{E}\dot{N}})}.$$

Для ТН небольшой мощности можно принимать $\alpha = 0,45 \dots 0,55$ [5]

Если для компенсации тепловых потерь используется солнечная установка (СУ) или электрические ветроагрегаты (ВА), то затраты C_y , связанные с расходом энергии, равны нулю, а затраты на нагревательное оборудование включают в себя или затраты $C_{\dot{N}\dot{O}}$ на СУ, или затраты $C_{\dot{A}\dot{A}}$ на ВА [6]:

$$C_{CO} = (\varepsilon + \sigma)_{\dot{N}\dot{O}} \cdot \ddot{O}_{\dot{N}\dot{O}} \cdot F_{\dot{N}\dot{E}}; \quad C_{AA} = (\varepsilon + \sigma)_{\dot{A}\dot{A}} \cdot \ddot{O}_{\dot{A}\dot{A}} \cdot N_{\dot{A}\dot{A}}.$$

Площадь солнечного коллектора (СК) можно определить из условия равенства суточных тепловых потерь из ТА вероятному количеству теплоты, получаемой от СУ [7]:

$$F_{\dot{N}\dot{E}} = \frac{0,024 \cdot \lambda_{\dot{e}} \cdot (\dot{O}_{\dot{O}\dot{A}} - \dot{O}_{\dot{i}\dot{e}\dot{\delta}})}{G_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}} \cdot \tilde{n}_{\dot{o}\dot{i}} \cdot (\dot{O}_{\dot{D}} - \dot{O}_{\dot{O}\dot{A}}) \cdot \hat{O}_N \cdot \tau_{\tilde{n}} \cdot \Psi_{\tilde{n}} \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{F_{\dot{O}}}{\delta_{\dot{e}}}. \quad (5)$$

Тогда

$$C_{\dot{N}\dot{O}} = \hat{A}_{\dot{N}\dot{O}} \cdot \frac{F_{\dot{O}}}{\delta_{\dot{e}}}, \quad (6)$$

$$\text{где } \hat{A}_{\dot{N}\dot{O}} = \frac{24 \cdot (\varepsilon + \sigma)_{\dot{N}\dot{O}} \cdot \ddot{O}_{\dot{N}\dot{O}} \cdot \lambda_{\dot{e}} \cdot (\dot{O}_{\dot{O}\dot{A}} - \dot{O}_{\dot{i}\dot{e}\dot{\delta}})}{G_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}} \cdot \tilde{n}_{\dot{o}\dot{i}} \cdot (\dot{O}_{\dot{D}} - \dot{O}_{\dot{O}\dot{A}}) \cdot \hat{O}_N \cdot \tau_{\tilde{n}} \cdot \Psi_{\tilde{n}}}.$$

Мощность ВА определяется суточным потреблением электроэнергии и вероятным временем работы ветроагрегатов:

$$N_{\dot{A}\dot{A}} = \frac{Q_{y\dot{\rho}\dot{\rho}}}{\tau_{\dot{A}\dot{A}}}.$$

Тогда

$$C_{\dot{A}\dot{A}} = \hat{A}_{\dot{A}\dot{A}} \cdot \frac{F_{\dot{O}}}{\delta_{\dot{e}}}, \quad (7)$$

где $\hat{A}_{\hat{A}\hat{\lambda}} = \frac{0,024}{\eta_f \cdot \tau_{\hat{A}\hat{\lambda}}} \cdot (\varepsilon + \sigma)_{\hat{A}\hat{\lambda}} \cdot \ddot{O}_{\hat{A}\hat{\lambda}} \cdot \lambda_{\hat{\varepsilon}} \cdot (\dot{O}_{\hat{\Delta}\hat{\lambda}} - \dot{O}_{i\hat{\varepsilon}\hat{\delta}})$ при использовании ТЭН;
 $\hat{A}_{\hat{A}\hat{\lambda}} = \frac{0,024}{\varphi_{\hat{\lambda}} \cdot \tau_{\hat{A}\hat{\lambda}}} \cdot (\varepsilon + \sigma)_{\hat{A}\hat{\lambda}} \cdot \ddot{O}_{\hat{A}\hat{\lambda}} \cdot \lambda_{\hat{\varepsilon}} \cdot (\dot{O}_{\hat{\Delta}\hat{\lambda}} - \dot{O}_{i\hat{\varepsilon}\hat{\delta}})$ при использовании ТН.

Приведенные годовые затраты на теплозащиту ТА зависят от площади теплообмена и толщины изоляции:

$$C_{\text{ог}} = \hat{A}_{\hat{\varepsilon}} \cdot F_{\hat{\Delta}} \cdot \delta_{\hat{\varepsilon}} + \hat{A}_y \cdot \frac{F_{\hat{\Delta}}}{\delta_{\hat{\varepsilon}}} + \hat{A}_f \cdot \frac{F_{\hat{\Delta}}}{\delta_{\hat{\varepsilon}}}, \quad (8)$$

где $\hat{A}_{\hat{\varepsilon}} = (\varepsilon + \sigma)_{\hat{\varepsilon}} \cdot \ddot{O}_{\hat{\varepsilon}}$,

$$\hat{A}_y = \frac{0,024}{Y} \cdot \lambda_{\hat{\varepsilon}} \cdot (\dot{O}_{\hat{\Delta}\hat{\lambda}} - \dot{O}_{i\hat{\varepsilon}\hat{\delta}}) \cdot n \cdot p \cdot \ddot{O}_y,$$

$$\hat{A}_f = \frac{0,024}{Y} \cdot \lambda_{\hat{\varepsilon}} \cdot (\dot{O}_{\hat{\Delta}\hat{\lambda}} - \dot{O}_{i\hat{\varepsilon}\hat{\delta}}) \cdot (\varepsilon + \sigma)_f \cdot \ddot{O}_f \cdot \frac{1}{\tau_f},$$

$Y = \eta_f$ при использовании ТЭН, $Y = \varphi_{\hat{\lambda}}$ при использовании ТН.

При заданном объеме теплоаккумулятора $V_{\hat{\Delta}\hat{\lambda}}$ площадь теплообмена, в первую очередь, зависит от формы ТА. Наиболее распространенными формами являются шар, цилиндр и прямоугольный параллелепипед. Минимальной площадью поверхности обладает шар. Тела других форм имеют площади поверхности, большие в k раз по сравнению с шаром. Так, для цилиндра диаметром D и высотой $L_{\hat{\delta}}$ коэффициент

$k_{\hat{\delta}} = \left(\frac{1}{2} + h_{\hat{\delta}} \right) \cdot \sqrt[3]{\frac{4}{9 \cdot h_{\hat{\delta}}^2}}$, где $h_{\hat{\delta}} = \frac{L_{\hat{\delta}}}{D}$; для параллелепипеда с ребрами D, b, c коэффициент

ент $k_f = \frac{2 \cdot (h_b + h_c + h_b \cdot h_{\bar{n}})}{\sqrt[3]{36 \cdot \pi \cdot h_b^2 \cdot h_c^2}}$, где $h_b = \frac{b}{D}$; $h_{\bar{n}} = \frac{c}{D}$.

Для цилиндров минимальное значение $k_{\hat{\delta}} = 1,14$ при $h_{\hat{\delta}} = 1$ (нормальный цилиндр); для параллелепипедов – $k_f = 1,24$ при $h_b = h_c = 1$ (куб).

В таблице 1 приведены выражения для расчета характерных величин ТА указанных форм.

Существенное влияние на приведенные годовые затраты оказывает толщина теплоизоляционного слоя $\delta_{\hat{\varepsilon}}$. Ее увеличение приводит, с одной стороны, к росту объема $V_{\hat{\varepsilon}}$ и затрат на теплоизоляцию, а, с другой стороны, снижает суточные тепловые потери и затраты на расход энергии и на нагревательную аппаратуру. Для выявления оптимальной толщины слоя теплоизоляции рассмотрим производную

$$\frac{\partial C_{\text{ог}}}{\partial \delta_{\hat{\varepsilon}}} = \hat{A}_{\hat{\varepsilon}} \cdot \frac{\partial V_{\hat{\varepsilon}}}{\partial \delta_{\hat{\varepsilon}}} + (\hat{A}_y + \hat{A}_f) \cdot \frac{\partial}{\partial \delta_{\hat{\varepsilon}}} \left(\frac{F_{\hat{\Delta}}}{\delta_{\hat{\varepsilon}}} \right). \quad (9)$$

Производная $\frac{\partial V_{\epsilon}}{\partial \delta_{\epsilon}}$ рассчитывается по следующим выражениям соответственно:

для шара

$$\pi \cdot (D^2 + 4 \cdot D \cdot \delta_{\epsilon} + 6 \cdot \delta_{\epsilon}^2),$$

для цилиндра

$$\pi \cdot \left[\left(\frac{1}{2} + h_{\delta} \right) \cdot D^2 + 4 \cdot D \cdot (2 + h_{\delta}) \cdot \delta_{\epsilon} + 18 \cdot \delta_{\epsilon}^2 \right],$$

для параллелепипеда

$$2 \cdot (h_b + h_c + h_b \cdot h_c) \cdot D^2 + 8 \cdot D \cdot (1 + h_a + h_b) \cdot \delta_{\epsilon} + 36 \cdot \delta_{\epsilon}^2.$$

Производная $\frac{\partial (F_{\delta} / \delta_{\epsilon})}{\partial \delta_{\epsilon}}$ рассчитывается по следующим выражениям соответственно:

для шара

для шара

$$\pi \left(2 - \frac{D^2}{\delta_{\epsilon}^2} \right),$$

для цилиндра

$$\pi \left[6 - \left(\frac{1}{2} + h_{\delta} \right) \frac{D^2}{\delta_{\epsilon}^2} \right],$$

для параллелепипеда

$$12 - 2(h_b + h_c + h_b \cdot h_c) \frac{D^2}{\delta_{\epsilon}^2}.$$

Приравняв производную $\frac{\partial C_{\delta}}{\partial \delta_{\epsilon}}$ нулю, получим уравнение

$$\dot{A}_1 \cdot \frac{\frac{\dot{A}_2}{\delta_{\epsilon}^2} - \dot{A}_3}{\dot{A}_2 + \dot{A}_4 \cdot \delta_{\epsilon} + 3 \cdot \dot{A}_3 \cdot \delta_{\epsilon}^2} = 1. \quad (10)$$

Выражения для вычисления $\hat{A}_1, \hat{A}_2, \hat{A}_3, \hat{A}_4$ для ТА рассматриваемых форм приведены в таблице 2.

Таблица 2

Обозначение	Размерность	Шар	Цилиндр	Параллелепипед
A_1	m^2	$\frac{\hat{A}_y + \hat{A}_f}{\hat{A}_e}$	$\frac{\hat{A}_y + \hat{A}_f}{\hat{A}_e}$	$\frac{\hat{A}_y + \hat{A}_f}{\hat{A}_e}$
A_2	m^2	D^2	$\left(\frac{1}{2} + h_o\right) \cdot D^2$	$(h_b + h_n + h_b \cdot h_n) \cdot D^2$
A_3	—	2	3	6
A_4	m	4D	$2 \cdot (2 + h_o) \cdot D$	$4 \cdot (1 + h_b + h_c) \cdot D$

Примечание:

- 1) если используется СУ, то $\hat{A}_1 = \frac{\hat{A}_{\tilde{N}O}}{\hat{A}_e}$;
- 2) если используются ВА, то $\hat{A}_1 = \frac{(\hat{A}_{AA} + \hat{A}_f)}{\hat{A}_e}$.

Уравнение (10) решается численным методом. Для вычисления приведенных годовых затрат полученное из него оптимальное значение δ_e^* подставляется в уравнение (8).

Условие экономической целесообразности использования теплового насоса в системе теплозащиты ТА может быть выявлено из неравенства:

$$(C_y + C_f)_{\hat{\alpha}} < (C_y + C_f)_{\hat{\alpha}i} .$$

Из него следует, что таким условием является:

$$\ddot{O}_{\hat{\alpha}} < \frac{(\varphi_a - 1) \cdot n \cdot p \cdot \tau_i \cdot \ddot{O}_y}{\varepsilon + \sigma} + \varphi_a \cdot \ddot{O}_{\hat{\alpha}i} . \tag{11}$$

Пример расчета

Тепловой аккумулятор объемом $V_{\hat{\alpha}} = 90 m^3$ с теплоизоляционным слоем из шлаковаты содержит горячую воду при $\hat{O}_{\hat{\alpha}} = 333 K$ ($t_{\hat{\alpha}} = 60 ^\circ C$) в течение $n = 20$ суток/цикл и в продолжении года $p = 5$ цикл/год. Необходимо оценить приведенные годовые затраты на тепловую защиту ТА по средним метеоданным летнего периода в г. Днепропетровске. В расчетах использованы следующие удельные стоимости: $\ddot{O}_e = 150 \text{ грн}/m^3$; $\ddot{O}_{\hat{\alpha}i} = 20 \text{ грн}/кВт$; $\ddot{O}_{\hat{\alpha}} = 200 \text{ грн}/кВт$; $\ddot{O}_{\tilde{N}O} = 180 \text{ грн}/m^2$; $\ddot{O}_{AA} = 2000 \text{ грн}/кВт$; $\ddot{O}_y = 0,22 \text{ грн}/кВт \cdot ч$.

Таблица 3 – Значения величин, входящих в уравнение (10)

№№ п/п	Обозначение	Размерность	Шар	Нормальный цилиндр	Куб
1	D	м	5,56	4,86	4,48
2	\dot{A}_2	м ²	0,099/0,0407	0,099/0,0407	0,099/0,0407
3	\dot{A}_2	м ²	30,91	35,43	60,21
4	\dot{A}_3	–	2	3	6
5	\dot{A}_4	м	22,24	29,16	53,76

Таблица 4 – Результаты расчета (в числителе нагрев ТЭН, в знаменателе – ТН)

№№ п/п	Обозначение	Размерность	Сфера	Нормальный цилиндр	Куб
1	δ_u^*	м	0,285/0,188	0,280/0,187	0,278/0,185
2	V_e	м ³	30,66/19,53	33,3/21,65	37,9/24,19
3	ϵ/δ_e^*	м	377,5/552,7	424,7/619,2	490,4/706,9
4	C_e	грн/год	367,9/234,4	399,6/259,8	454,8/290,3
5	C_f	грн/год	437,9/215,5	492,6/241,5	568,9/275,7
6		грн/год	10,9/54,2	12,3/60,7	14,2/69,3
7	$C_{\alpha\zeta}$	грн/год	816,7/504,1	904,5/562,0	1037,9/635,3

Таблица 5 – Результаты расчета для ТА кубической формы при нагреве от СУ и ВА с ТН

Тип системы нагрева	δ_e^*	V_e	$F_{\dot{O}}/\delta_e^*$	C_e	C_f	$C_{\alpha\zeta}$
СУ	0,365	51,7	388,06	620,4	1543,7	2164,1
ВА с ТН	0,365	51,7	388,06	620,4	872,3	1492,7

Выводы

Предлагаемая методика технико-экономического анализа позволяет оценить влияние составляющих приведенных затрат на тепловую защиту теплового аккумулятора и определить оптимальную толщину теплоизоляционного слоя с выбранным значением коэффициента теплопроводности материала изоляции.

Условные обозначения

ζ – приведенные годовые затраты; \hat{O}_N – функция, зависящая от параметров солнечного коллектора и теплообменника в ТА; \dot{O} – удельная стоимость; α – коэффициент, суммарно учитывающий все потери в ТН; δ – толщина слоя; ϵ – коэффициент эффективности капиталовложений; η – коэффициент полезного действия; λ – коэффициент теплопроводности; σ – коэффициент, учитывающий отчисления на текущий ремонт, зарплату и т.д.; τ – длительность работы в каждом сутках; φ_e – действительный коэффициент преобразования ТН; ψ – коэффициент солнечного сияния; b, c –ребра

параллелепипеда; $\tilde{n}_{\delta i}$ – удельная теплоемкость теплоносителя; D – характерный размер; F – площадь наружной поверхности; h – удлинение; G – расход теплоносителя; n – число суток хранения в одном цикле; p – число циклов в году; N – мощность; $Q_{\tilde{n}\delta}$ – суточный расход; T – температура по шкале Кельвина; ΔT – средний температурный напор; V – объем.

Индексы

\hat{A} – ветроагрегат; \hat{e} – изоляция; $\hat{E}\tilde{N}$ – испаритель теплового насоса; \hat{E} – конденсатор теплового насоса; n – нагрев; \hat{I} – нагревательная аппаратура; $\hat{i}\hat{e}\hat{\delta}$ – окружающая среда; \hat{I} – параллелепипед; $\hat{\delta}$ – равновесный; \tilde{n} – солнечный; $\tilde{N}\hat{E}$ – солнечный коллектор; $\tilde{n}\delta$ – силовая стенка; $\tilde{N}\hat{O}$ – солнечная установка; \hat{O} – тепловой; $\hat{O}\hat{A}$ – тепловой аккумулятор; $\hat{O}\hat{C}$ – тепловая защита; $\hat{O}\hat{I}$ – тепловой насос; δi – теплоноситель; $\delta\hat{i}$ – удельный; δ – цилиндр; y – энергия.

Литература

1. Даффи Дж.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Даффи Дж.А., Бекман У.А.: Пер. с англ. – М.: Мир, 1977. – 420 с.
2. Левенберг В.Д. Аккумулирование тепла / В.Д. Левенберг, М.Р. Ткач, В.А. Гольстрем: – К.: Техника, 1991. – 112 с.
3. Сиворакша В.Е. Марков В.Л., Петров Б.Е. Комбинированная теплозащита сезонных тепловых аккумуляторов / Сиворакша В.Е., Марков В.Л., Петров Б.Е. // Научно-практический журнал „Интегрированные технологии и энергосбережение”, 2005, № 3. – С. 37–41.
4. Валов М.И. Оценка экономической эффективности систем солнечного теплообеспечения / Валов М.И., Зимин Е.Н.: Под ред. Е.В. Калинина – М.: МЭИ, 1988. – 48 с.
5. Мартыновский В.С. Анализ действительных термодинамических циклов – М.: Энергия, 1972. – 216 с.
6. В.Е. Сиворакша. Технично-економическая оптимизация комбинированной солнечно-ветровой системы горячего водоснабжения / В.Е. Сиворакша, В.Л. Марков, Б.Е. Петров // Проблемы высокотемпературной техники: Зб. наук. пр. – Дніпропетровськ: РВВ ДНУ, 2004. – С. 116–123.
7. Сиворакша В.Ю. Теплові розрахунки геліосистем / Сиворакша В.Ю., Марков В.Л., Петров Б.Є., Золотько К.Є., Стаценко І.М. // Монографія – Дніпропетровськ: Вид-во ДНУ, 2003. – 132 с.

УДК 662.997

Сиворакша В.Ю., Марков В.Л.

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ СПОСОБІВ ПІДТРИМАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В ТЕПЛОАКУМУЛЯТОРАХ

Пропонується методика техніко-економічного аналізу способів підтримання температури в теплових акумуляторах, яка дозволяє оцінити вплив складових зведених річних витрат на їх теплозахист та визначити оптимальну товщину теплоізоляційного шару з вибраним значенням коефіцієнту теплопровідності матеріалу.