УДК 620.92

В.В.Козырский, докт.техн.наук, **Л.В.Мартынюк, И.Алекшеюк** (Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Киев)

Моделирование процессов теплообмена в аккумуляторах гелиоустановок

Приведены математические модели процессов, протекающих в аккумуляторах. Указаны пути их решения. Представлены обобщенные уравнения трехпотокового аккумулятора теплоты.
Ключевые слова: *аккумулятор теплоты, гелиоустановка, теплообмен, математическое моделирование, оптимизация.*

Наведено математичні моделі процесів, які відбуваються в акумуляторах. Показано шляхи їх вирішення. Наведені узагальнюючі рівняння трипотокового акумулятора теплоти.
Ключові слова: *акумулятор теплоти, геліоустановка, теплообмін, математичне моделювання, оптимізація.*

Введение. Энергетические системы с использованием солнечной энергии имеют много преимуществ: распространенность нахождения, неисчерпаемость, бесплатность, безопасность эксплуатации, минимальное воздействие на окружающую среду и достаточно высокая эстетичность.

Однако этим системам присущи и недостатки, среди которых, прежде всего, изменчивость во времени. Этот недостаток может быть снижен при использовании аккумуляторов энергии.

Целью исследований является разработка математической модели процесса теплообмена в аккумуляторе солнечного коллектора.

Материалы и методы исследований. Надежные и эффективные системы аккумулирования энергии не только обеспечат стабильное энергоснабжение потребителей, но и повысят коэффициент использования энергии за счет накопления пиковой и низкопотенциальной энергии, которая не может быть использована без соответствующих ее преобразований. Поэтому проблема наиболее эффективного аккумулирования является, несомненно, актуальной. Применение тепловых аккумуляторов позволяет повысить на 30-50% эффективность использования возобновляемых источников энергии и, в первую очередь, солнечной энергии.

Основные средства повышения эффективности тепловых аккумуляторов заключаются в использовании методов математического моделирования изучаемых явлений и методов оптимизации.

Результаты исследований. В гелиоустановках чаще всего используюся жидкостные аккумуляторы теплоты. При формулировке задачи принимаются допущения: в аккумуляторе отсутствует вынужденное течение жидкости; используется одномерная модель, то есть, температура считается постоянной в пределах горизонтального слоя в баке-аккумуляторе; коэффициенты теплопроводности жидкости и стенок бака постоянные. Жидкость находится в баке в точке, температура которой ближе всего к собственной температуре жидкости. Течение в баке, которое вызвано действием градиентных сил, отсутствует; нет вертикального перемешивания. В системе нет внутренних источников тепла.

Уравнение, описывающее аккумулирующую систему, имеет вид:

$$\frac{\left(Mc_p\right)_s}{H}\frac{\partial T_s}{\partial t}=k_pA_s\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2}-\frac{\left(UA\right)_s}{H}\left(T_s-T_{об}\right). \quad (1)$$

Введем следующее безразмерные переменные:

$$\xi/H;\ t=\alpha t/H^2, \quad (2)$$

где $\alpha=k_p/\left(\rho c_p\right)$,

тогда уравнение (1) преобразуется к виду:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t}-\frac{\partial^2 T_s}{\partial \xi^2}+\left[UA\right]_p\left(T_s-T_{об}\right)=0, \quad (3)$$

где $\left[UA\right]_p=\left[UA\right]_s H/\left(\gamma_p A_x\right)$ – безразмерный коэффициент тепловых потерь аккумулятора в условиях отсутствия течения. Этому случаю от-

© В.В.Козырский, Л.В.Мартынюк, И.Алекшеюк, 2014

 ISSN 1819-8058

вечают следующие предельные и начальные условия:

$$\frac{\partial T_s}{\partial \xi}\left(\xi=0,t\right)=0; \tag{4}$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial \xi}\left(\xi=1,t\right)=0; \tag{5}$$

$$T_s\left(\xi,0\right) - \text{заданная функция } \xi. \tag{6}$$

В этих уравнениях приняты обозначения: M – массовый расход; c_p – удельная теплоемкость жидкости в аккумуляторе; H – высота бака-аккумулятора; $U=\left(UA\right)_s/W_\tau$; W_τ – водяной эквивалент для теплообменника контура коллектора; A – площадь; U – безразмерный коэффициент тепловых потерь в аккумуляторе; t – время; λ_p – коэффициент теплопроводности; индекс s означает аккумулятор; x – поперечное сечение.

Уравнение (3) с учетом предельных и начальных условий решается методами теории нестационарной теплопроводности [1].

Приведем решение задачи определения температурного поля в жидком аккумуляторе.

Жидкостный аккумулятор теплоты представляет собой бак с горячей водой. В баке находится змеевик, который служит источником тепла. Аккумулятор обычно представляет собой вертикальный цилиндрический бак при соотношении его высоты к диаметру $h/d=$ 3…5.

Задача состоит в определении температурного поля ограниченного цилиндра при наличии внутреннего источника тепла. Можно принять, что перемещение жидкости в баке незначительное, и поэтому основным процессом передачи тепла является теплопроводность. Таким образом, задача формулируется так: есть ограниченный цилиндр (– h < z< h, ω < r <R), который сначала имеет температуру, равную температуре окружающей среды T_0. В начальный момент времени боковая поверхность цилиндра и поверхности торцов начинают нагреваться с постоянной скоростью b, град/с, где $b \le \lambda/\sqrt{a}$ – коэффициент тепловой активности (λ – теплопроводность; a – температуропроводность).

Согласно формулировке задачи, математическая модель формируется в виде двумерного уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau}=a\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial^2 T}{\partial Z^2}\right]. \tag{7}$$

Краевые условия записываются следующим образом:

$$T\left(r,z,0\right)=T_0; \tag{8}$$

$$T\left(r,h,\tau\right)=T\left(R,z,\tau\right)T_0+b\tau; \tag{9}$$

$$\frac{\partial T\left(r,0,\tau\right)}{\partial z}=0; \tag{10}$$

$$\frac{\partial T\left(0,z,r\right)}{\partial r}=0. \tag{11}$$

Общее решение сформулированной задачи основывается на методе интегральных преобразований Ханкеля и Лапласа [2]:

$$T\left(r,z,t\right)-T_0=br-\frac{bR^2}{4a}\left[1-\frac{r^2}{R^2}-8\sum_{n=1}^{\infty}\frac{J_0\left(\mu_0\frac{r}{R}\right)ch\mu_0\frac{z}{R}}{\mu^3 J_1\left(\mu_n\right)ch\mu_n k}\right]+$$
$$+\frac{4bh^2}{a}\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{\left(-1\right)^{m+1}J_0\left(\mu_n\frac{r}{R}\right)\cos\lambda_m\frac{z}{h}}{\mu_n J_1\left(\mu_n\right)\lambda_m\left(\lambda_m^2+\mu_n^2k^2\right)}\times\exp\left[-\left(\lambda_m^2+\mu_n^2k^2\right)Fo_h\right]. \tag{12}$$

В этом уравнении, кроме указанных выше, приняты следующие обозначения: J_0, J_1 – функции Бесселя нулевого и первого порядка первого рода; $\lambda_m = (2m-1)\pi/2$ – теплопроводность; m – темп изменения температуры; $k = h/R$; $Fo = \alpha\tau/h$ – критерий Фурье; μ_n – корни характеристического уравнения:

$$J_0(\mu) = 0. \tag{13}$$

Из уравнения (12) можно получить безразмерные зависимости для рассматриваемого процесса:

$$\frac{\theta}{PdFo} = f\left(k, \frac{r}{R}, \frac{z}{h}, Fo\right), \tag{14}$$

где $Pd = \left(\dfrac{d\theta}{dFo}\right)_{\max}$ – критерий Предводителя; $\theta = \dfrac{T(r,z,\tau)-T_0}{T_0}$ – относительная избыточная температура в произвольной точке тела.

Приведенное критериальное уравнение может быть использовано для обработки исследуемых параметров в безразмерных координатах.

Метод оптимизации проиллюстрируем на примере аккумулятора, обеспечивающего одновременное аккумулирование и потребление энергии.

Он представляет собой две теплообменные поверхности, расположенные в среде, которая аккумулирует тепло. В данном случае тепловой поток от источника тепла передается потребителю через аккумулирующую среду. Фазы работы аккумулятора для суточного аккумулирования следующие:

– зарядка при отключенном потреблении:

$$Q_Д = Q_A; \tag{15}$$

– зарядка при включенном потреблении:

$$Q_Д = Q_A + Q_C; \tag{16}$$

– работа при полной зарядке аккумулятора:

$$Q_A = Q_C; \tag{17}$$

– разрядка при "пиковых" нагрузках:

$$Q_Д + Q_A = Q_C; \tag{18}$$

– разрядка при включенном источнике:

$$Q_A = Q_C. \tag{19}$$

Сезонный аккумулятор может быть рассмотрен как частный случай с двумя фазами работы, описываемыми уравнениями (15) – (19). В этих уравнениях Q – тепловой поток, где индексы означают: A – аккумулятор; $Д$ – источник тепла; C – потребитель.

В аккумуляторе присутствуют три тепловых потока. Расчет трехпотоковых аккумуляторов производится на основе математических моделей многопотоковых теплообменных аппаратов.

При рассмотрении комплексной системы теплохолодоснабжения вопросы оптимизации также должны носить комплексный характер и учитывать все преобразования энергии внутри системы, включая полный набор периферийного оборудования.

Работа аккумулятора теплоты основывается на двух графиках:

- поступления теплоты (в нашем случае – солнечной энергии).
- потребления теплоты (отопление и горячее водоснабжение).

Дополнительной информацией являются статистические данные об интенсивности солнечной радиации в данной местности, т.е. $dQ_Д = f(T_Д)$ и график потребления теплоты при условии, что температура теплоносителя на выходе из аккумулятора теплоты всегда постоянна, т.е. $dQ_Д = f(G_Д)$.

В общем случае условия теплообмена имеют вид:

$$DQ_Д = \alpha_Д (T_Д - T_{CT}) dF_Д; \tag{20}$$

$$DQ_C = \alpha_C (T_{CT} - T_C) dF_C; \tag{21}$$

$$DQ_A = \alpha_A (T_{CT} - T_A) dF_A. \tag{22}$$

Математическая модель системы в целом представлена моделями каждого отдельного элемента в виде набора функциональных операторов (теория, моделирование, расчет и апробация) следующим образом [3]:

$$\begin{aligned} Y_i &= f_{Y_i}(X_i, U_i, K_i, Г_i); \\ Ф_i &= f_{Ф_i}(X_i, U_i, K_i, Г_i); \\ \psi_i &= f_{\psi_i}(X_i, U_i, K_i, Г_i). \end{aligned} \tag{23}$$

 ISSN 1819-8058

На основе обобщенной математической модели (23) предлагается следующая модель трехпотокового аккумулятора теплоты:

$$X_A = \{p_A, h_A, G_A, \xi_A, p_Д, h_Д, \xi_Д, p_C, h_C, G_C, \xi_C\};$$
$$Y_A = \{T_A, s, \rho_A, \xi_A\}; \qquad (24)$$

$U_A = \{\theta_A\}$ – при полной зарядке аккумулятора;

$U_A = \{T_A\}$ – для всех других случаев;

$$\varphi_A = \{Q_A, \eta_A\};$$
$$K_A = \{F_Д, V_Д, F_C\}. \qquad (25)$$

В уравнениях (20) – (25) приняты обозначения: α – коэффициент теплоотдачи; T – температура; F – поверхность теплообмена; Y – выходные параметры; Φ – функциональные характеристики; ψ – вид функции уравнения состояния; f_Y, f_Φ, f_ψ – нелинейные функции; X – входные внутренние параметры; U – выходные внутренние параметры; K – конструктивные параметры; Γ – топология элемента в схеме; p – давление; h – удельная энтальпия; ρ – плотность; s – удельная энтропия; ξ – концентрация; G – массовый расход теплоносителя; θ_a – суммарный температурный напор в аппаратах абсорбционного теплового насоса; φ – коэффициент технико-экономического совершенства; V_A – объем аккумулирующего вещества; индекс i означает произвольный элемент; CT – стенка теплообменника.

Источником тепла рассматриваемой установки с трехпотоковым аккумулятором служит солнечная энергия. Для повышения эффективности системы теплоснабжения в схему включен абсорбционный тепловой насос. Если анализируется сезонный (двухпотоковый) аккумулятор теплоты, в системе (24) отсутствующие потоки приравниваются нулю.

Конкретизация связей системы (24) выполнена по зависимостям, представленным в [4, 5]. Решение конкретизированных связей замыкается набором балансовых уравнений первого элемента: расходов, энергии, гидравлических напоров, изменения энтальпии, энтропии.

В выводах отметим, что оптимизацию энергосберегающих систем необходимо основывать на методе эксергоэкономической оптимизации [6].

Выводы. Приведенный метод моделирования позволяет повысить эффективность аккумуляторов гелиоустановки. Оптимизацию гелиосистемы следует основывать на методе эксергоэкономического выбора возможных вариантов.

1. *Васильев Г.П., Шилкин Н.В.* Использование низкопотенциальной тепловой энергии в теплонасосных системах. – АВОК. – 2003. – №2. – С. 52–60.
2. *Бекман Г., Гилли П.* Тепловое аккумулирование энергии. – М.: Мир, 1987. – 272 с.
3. *Харченко Н.В.* Индивидуальные солнечные установки. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 208 с.
4. *Дубковский Б., Денисова А.* Использование солнечной энергии в комбинированных энергоустановках // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2000. – №2. – С. 11–13.
5. *Васильев Г.П.* Теплохладоснабжений зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев земли. – М.: Красная звезда, 2006. – 314 с.
6. *Карслоу Е., Егер Д.* Теплопроводность твердых тел. – М., 1964. – 488 с.