Разработана методика расчета сопряженного теплообмена вертикального плоскопараллельного оребрения в условиях свободной конвекции. Проведен расчет и определены основные интегральные и локальные характеристики исследуемой поверхности. Проведено сопоставление с известными экспериментальными данными и результатами расчета по упрощенным моделям теплопереноса.

Вертикальная поверхность с плоскопараллельным оребрением, свободная конвекция, теплообмен, тепловой поток, температурное распределение, эффективность ребра.

The technique of calculation of conjugate heat transfer for planar vertical finning under conditions of natural convection is developed. The calculation and principal integral and local characteristics of the surface are found. Comparison with known experimental data and the calculation results in a simplified model of heat transfer are made.

Vertical planar surface with fins, free convection, heat transfer, heat flow, temperature distribution, efficiency fin.

УДК 620.92

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АККУМУЛЯТОРОВ ГЕЛИОУСТАНОВОК

Б.Х. Драганов, доктор технических наук

Изложен метод анализа теплообменных процессов в аккумуляторе и указаны пути их решения. Приведены основы оптимизации исследуемых процессов.

Математическое моделирование, краевые условия, преобразование Ханкеля и Лапласа, критерий Прандтля, функциональный оператор.

Энергетические системы с использованием солнечной энергии имеют много преимуществ: неисчерпаемость, бесплатность их использования, 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.

Надежные и эффективные системы аккумулирования энергии не только обеспечат стабильное энергоснабжение потребителей, но и повысят коэффициент использования энергии за счет накопления пиковой и низко потенциальной энергии, которая не может быть получена 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.

Цель исследований – разработка метода математического моделирования процессов, имеющих место в аккумуляторе тепла и указание средств определения эффективности зарядки и разрядки аккумулятора.

Материалы и методика исследований. Основные средства повышения эффективности тепловых аккумуляторов заключаются в использовании методов математического моделирования изучаемых явлений и методов оптимизации. В гелиоустановках чаще всего используют 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, вызванное действием градиентных сил, отсутствует; не происходит вертикальное перемешивание. В системе нет внутренних источников тепла.

Уравнение, описывающее аккумулирующую систему, имеет вид:

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

После введения следующих безразмерных переменных

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

где $\alpha = k_p / (\rho c_p)$,

уравнение (1) преобразуется к виду:

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

где $[UA]_p = [UA]_s H / (\gamma_p A_x)$ – безразмерный коэффициент тепловых потерь аккумулятора в условиях отсутствия течения. Этому случаю отвечают следующие предельные и начальные условия:

$$\frac{\partial\ T_s}{\partial \xi}(\xi = 0, t) = 0; . \quad (4)$$

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

$T_s(\xi, 0)$ – заданная функция ξ. (6)

В этих уравнениях приняты обозначения: *M* – массовый расход;, кг/с; c_p – удельная теплоемкость жидкости в аккумуляторе, Дж/(кг·К); *H* – высота бака-аккумулятора, м; $U = (UA)_s / W_\tau$; W_τ – водяной эквивалент для теплообменника контура коллектора; *A* – площадь, м^2; U –

безразмерный коэффициент тепловых потерь в аккумуляторе; $\boldsymbol{t}$ – время, с; λ_p – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К; индекс *s* означает аккумулятор; χ – поперечное сечение.

Уравнение (3) с учетом предельных и начальных условий решается методами теории нестационарной теплопроводности [4].

Результаты исследований. Приведем решение задачи определения температурного поля в жидком аккумуляторе.

Аккумулятор с жидкостным теплоаккумуляционным материалом (ТАМ) представляет собой вертикальный цилиндрический бак с горячей водой при соотношении его высоты к диаметру $h/d=$ 3…5. В баке находится змеевик, который является источником тепла.

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. Следовательно, задача формулируется так: дано 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, К/с, где $b \le \lambda/\sqrt{a}$ – коэффициент тепловой активности (λ – теплопроводность, Вт/(м·К); *a* – температуропроводность, м^2/с).

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:

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

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

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

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

Общее решение сформулированной задачи основывается на методе интегральных преобразований Ханкеля и Лапласа [5]:

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

В этом уравнении, кроме выше указанных, приняты обозначения: J_0, J_1 – функции Бесселя нулевого и первого порядка первого рода; $\lambda_m = (2m-1)\pi/2$ – теплопроводность, Вт/(м·К); m – скорость изменения температуры, К/с; $k = h/R$; $Fo = \alpha\tau/h$ – 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 $Pd = \left(\frac{d\theta}{dFo}\right)_{\max}$ – критерий Прандтля; $\theta = \frac{T(r,z,\tau) - T_0}{T_0}$ – 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, которые аккумулируют 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: *А* – аккумулятор; *Д* – источник тепла; *С* – 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:

$$DQ_Д = \alpha_Д (T_Д - T_{СТ}) dF_Д; \quad (20)$$

$$DQ_С = \alpha_С (T_{СТ} - T_С) dF_С; \quad (21)$$

$$DQ_A = \alpha_A (\grave{O}_{CT} - \grave{O}_A) dF_A. \quad (22)$$

Математическая модель системы в целом представлена моделями каждого отдельного элемента в виде набора функциональных операторов (теория, моделирование, расчет и апробация) [2]:

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \varphi_A &= \{Q_A, \eta_A\}; \\ K_A &= \{F_Д, V_Д, F_C\}. \end{aligned} \quad (25)$$

В уравнениях (20) – (25) приняты обозначения: α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·К); *Т* – температура, К; F – поверхность теплообмена, м^2; Y – выходные параметры; *Ф* – функциональные характеристики; ψ – вид функции уравнения состояния; $f_Y, f_Ф, f_\psi$ – нелинейные функции; X – входные внутренние параметры; U – выходные внутренние параметры; K – конструктивные параметры; *Г* – топология элемента в схеме; p – давление, Па; h – удельная энтальпия, Дж/кг; ρ – плотность, кг/м^3; s – удельная энтропия, Дж/(кг·К), ; ξ – концентрация; G – массовый расход теплоносителя, кг/с; θ_a – суммарный температурный напор в аппаратах абсорбционного теплового насоса, К; φ – коэффициент технико-экономического совершенства; V_A – объем аккумулирующего вещества, м^3; индекс i означает произвольный элемент, *СТ* – стенка теплообменника.

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

Конкретизация связей системы (24) выполнена по зависимостям, представленными в [1, 8]. Решение конкретизированных связей замыкается набором балансовых уравнений первого элемента: расходов, энергии, гидравлических напоров, изменения энтальпии, энтропии.

Для определения энергетических и экономических показателей конкретного анализируемого аккумулятора теплоты следует обратиться к эксергоэкономической концепции оптимизации [6,7,9,10].

Выводы

Надежный метод определения энергетических показателей аккумулятора теплоты основывается на математическом моделировании исследуемых процессов. Оценка энергетической эффективности решений определяется оптимизацией анализируемых вариантов структурных и параметрических решений.

Список литературы

1. Драганов Б. Повышение эффективности систем солнечного теплохладоснабжения / Б. Драганов, В. Фара, Т. Гулько // Международный сельскохозяйственный журнал. – 1994. – №5. – С. 47–49.
2. Драганов Б.Х. Теплонаносные системы с аккумуляторами теплоты / Б.Х. Драганов, Т.В. Морозюк, Р.К. Никульшин // Пром. теплотехника. – 2000. – Т.22, № 5–6. – С. 46–49.
3. Драганов Б.Х. Термодинамическая оптимизация энергетических систем при эксплуатационном и экологическом режиме работы /Б.Х. Драганов // Экотехнологии и ресурсозбережение. – 2006. – №2. – С. 8–10.
4. Коздоба Л.А. Решение нелинейных задач теплопроводности / Л.А. Коздоба. – К.: Наук. думка, 1976. – 136 с.
5. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: Наука, 1966. – 724 с.
6. Тсатсаронис Дж. Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы / Дж. Тсатсаронис. – Одесса: ООО «Студия «Негоциант», 2002. – 152 с.
7. Bejan A., Tsatsaronis G., Moran M. Thermal Design and Optimization, John Wiley and Sons, New York, 1996.
8. Draganov B. Enhancement of Heliothermal Systems Efficiency / B. Draganov, L. Fara. – Solar Energy for Sustainable Development, 1994. – Vol.3. – №3. – P. 63-66.
9. Draganov B., Dragan G. Methods of Power Systems Optimization // Bulletin of the Polytechnics Institute. Tom XLVIII (L.II), 2002. – P. 191–198.
10. Morosuk T. Exergoeconomics Methods in Absorption Thermo-transforms Optimization // Industrial Heat Engineerin,– 2000. – V.4 (22). – P. 15–9.

Викладено метод аналізу теплообмінних процесів в акумуляторі та вказано шляхи їх вирішення. Наведені основи оптимізації досліджуваних процесів.

Математичне моделювання, крайові умови, перетворення Ханкеля і Лапласа, критерій Прандтля, функціональний оператор.

The article a method for the analysis of heat transfer processes in the accumulator and the indicated solutions. The foundations of the optimization of the processes studied.

Mathematical modeling, boundary conditions, Hankel transform and Laplace, Prandle criterion , functional operator.

УДК 007.52

ОРІЄНТАЦІЯ МОБІЛЬНОГО РОБОТА В ПРОСТОРІ ТЕПЛИЦІ ЗА ДОПОМОГОЮ ЙМОВІРНІСНИХ АВТОМАТІВ ТА СТИМУЛЮЮЧОГО НАВЧАННЯ

В.П. Лисенко, І.М. Болбот, кандидати технічних наук
І.І. Чернов, аспірант*

Розглянуто метод вирішення задачі орієнтування мобільного робота за допомогою ймовірнісних автоматів. Опрацьовано теоретичну складову ймовірнісних автоматів теплиці як поля для переміщення робота. На основі теоретичних досліджень створено програмне забезпечення, що дозволяє розраховувати шлях пересування робота в просторі теплиці із урахуванням імовірних перешкод.

Імовірність, орієнтування мобільного робота, тепличне господарство, стимулююче навчання.

Дотепер часу успішно вирішені завдання глобальної навігації, але її використання стає проблематичним, коли потрібно, щоб робот орієнтувався всередині приміщень. Взагалі робота всередині закритих приміщень характеризується безліччю найрізноманітніших перешкод, починаючи від нерівномірності освітлення і закінчуючи проблемами відображення радіосигналів. У такому разі середовище вважається погано обумовленим, з ненадійними каналами зв'язку, з принциповою неточністю і невизначеністю. Тоді очевидною стає необхідність дослідження способів орієнтування, здатних працювати в цьому середовищі.

Мета досліджень – створення алгоритму орієнтування мобільного робота в просторі блочної теплиці, що має деяку стохастичну природу.

---

* Науковий керівник – кандидат технічних наук, професор В.П. Лисенко