УДК 536.1

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Б.Х. Драганов, доктор технических наук
А.В. Мищенко, Е.В. Шелиманова, кандидаты технических наук

Проанализирован процесс теплообмена в пористой среде. Изучаемый процесс предполагается осесимметричным и стационарным, его эффективность определяется по величине производства энтропии.

Пористая среда, теплообмен, диссипация тепловой энергии, степень производства энтропии, функция Бесселя.

Пористые среды широко используются во многих областях теплоэнергетики. Они играют существенную роль в процессах аккумулирования тепла. Аккумулирование энергии не только обеспечит стабильное энергоснабжение потребителей, но и повысит коэффициент использования энергии за счет накопления пиковой и низкопотенциальной энергии, которая не может быть получена без соответствующих ее преобразований. Поэтому проблема наиболее эффективного аккумулирования является, несомненно, актуальной. Применение тепловых аккумуляторов позволяет значительно повысить эффективность использования возобновляемых источников энергии [1, 13].

Проблеме тепломассообмена в пористых средах посвящено большое количество работ [10, 14, 18, 20].

Цель исследований – изучение температурного поля ограниченного цилиндра при наличии внутреннего источника тепла.

Материалы и методика исследований. Можно принять, что перемещение жидкости в баке незначительное и поэтому основным процессом передачи тепла является теплопроводность.

Таким образом, задача формулируется следующим образом: дано ограниченный цилиндр ($-h < z < h$, $\omega < r < R$), что сначала имеет температуру, равную температуре окружающей среды T_0. В начальный момент времени боковая поверхности 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 [5]:

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

Краевые условия записываются следующим образом

$$T(r,z.0)=T_0; \qquad (2)$$

$$T(r,h,\tau)=T(R,z,\tau)T_0+b\tau; \qquad (3)$$

$$\frac{\partial T(r,0,\tau)}{\partial z}=0; \qquad (4)$$

$$\frac{\partial T(0,z,r)}{\partial r}=0. \qquad (5)$$

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

$$T(r,z,t)-T_0=br-\frac{bR^2}{4a}\left[1-\frac{r^2}{R^2}-8\sum_{n=1}^{\infty}\frac{J_0\left(\mu_0\frac{r}{R}\right)ch\mu_0\frac{z}{R}}{\mu^3 J_1(\mu_n)ch\mu_n k}\right]+$$

$$+\frac{4bh^2}{a}\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{(-1)^{m+1}J_0\left(\mu_n\frac{r}{R}\right)\cos\lambda_m\frac{z}{h}}{\mu_n J_1(\mu_n)\lambda_m\left(\lambda_m^2+\mu_n^2k^2\right)}\times\exp\left[-\left(\lambda_m^2+\mu_n^2k^2\right)Fo_h\right]. \qquad (6)$$

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

$$J_0(\mu)=0. \qquad (7)$$

Из уравнения (6) можно получить безразмерные зависимости для рассматриваемого процесса:

$$\frac{\theta}{PdFo}=f\left(k,\frac{r}{R},\frac{z}{h},Fo\right), \qquad (8)$$

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

Приведенное критериальное уравнение может быть использовано для обработки исследуемых параметров в безразмерных координатах, которые лежат в основе обработки экспериментальных данных.

Результаты исследований. Для оптимизации энергетических систем в настоящее время используются следующие методы:

– теоретико-графовых построений [17];

– эксергоэкономический [16,18];

– энтропийный [12, 15, 20].

При оптимизации энергопотребляющих систем методом энтропийного анализа нет необходимости оперировать показателями стоимости элементов исследуемых вариантов структуры установки. Поэтому целесообразно обратиться к этому методу по энергетическим показателям.

Исходная система уравнений для осесиметричного и стационарного случая записывается так:

– состояния:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho u)+\frac{1}{r^n}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho \upsilon)=0, \tag{9}$$

– движения в направлении координаты z:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho uu)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho \upsilon u)=-\frac{\partial \rho}{\partial z}+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_e\frac{\partial u}{\partial z}\right)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\mu_e\frac{\partial u}{\partial r}\right)-f\frac{\mu_e u}{K}-f\frac{\rho F}{\sqrt{K}}|u|u, \tag{10}$$

– движения в направлении радиуса r:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho u\upsilon)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho \upsilon\upsilon)=-\frac{\partial \rho}{\partial z}+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_e\frac{\partial \upsilon}{\partial z}\right)+\frac{1}{r^n}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\mu_e\frac{\partial \upsilon}{\partial r}\right)-$$

$$-f\frac{\mu_e \upsilon}{K}-f\frac{\rho F}{\sqrt{K}}|u|\upsilon-\frac{\mu_e\upsilon}{r^2}n, \tag{11}$$

где u, υ – компоненты скорости; ρ – плотность; f – параметры, определяющие степень пористости исследуемого тела; μ_e – эффективная вязкость; K – площадь, м^2; F – показатель интенсивности; $|u|=\left(u^2+\upsilon^2\right)^{0.5}$, м/с.

Уравнение энергии, если пренебречь эффектом диссипации, в силу вязкости, а также теплообменом имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial}(\rho_e c_e uT)+\frac{1}{r^n}\frac{\partial}{\partial r}\left(\rho_e c_e r^n \upsilon T\right)=\frac{\partial}{\partial z}\left(k_e\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\frac{1}{r^n}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^n k_e\frac{\partial T}{\partial r}\right), \tag{12}$$

где k_e, c_e и ρ_e – соответственно эффективный коэффициент теплопроводности, эффективный коэффициент теплообмена и эффективная плотность.

В безразмерной форме анализируемая система уравнений записывается следующим образом:

– в направлении Z:

$$\frac{\partial}{\partial Z}(VU)+\frac{1}{R^n}\frac{\partial}{\partial R}\left(R^n VU\right)=-\frac{\partial P}{\partial Z}+\frac{1}{R_e}\left[\frac{\partial}{\partial Z}\left(\frac{\partial U}{\partial Z}\right)+\frac{1}{R^n}\frac{\partial}{\partial R}\left(R^n\frac{\partial U}{\partial R}\right)\right]-f\frac{U}{D_a R_e}, \tag{13}$$

– в направлении R:

$$\frac{\partial}{\partial Z}(UV)+\frac{1}{R^n}\frac{\partial}{\partial R}\left(R^n VU\right)=-\frac{\partial P}{\partial R}+\frac{1}{R_e}\left[\frac{\partial}{\partial Z}\left(\frac{\partial V}{\partial Z}\right)+\frac{1}{R^n}\frac{\partial}{\partial R}\left(R^n\frac{\partial V}{\partial R}\right)\right]-$$
$$-f\frac{V}{D_a R_e}-f\frac{V}{R_e R^2}n; \tag{14}$$

– уравнение энергии:

$$\frac{\partial}{\partial Z}(U\Theta)+\frac{1}{R^n}\frac{\partial}{\partial R}\left(R^n V\Theta\right)=\frac{1}{P_e}\left(\frac{\partial^2\Theta}{\partial Z^2}\right)+\frac{1}{P_e R^n}\frac{\partial}{\partial R}\left(R^n\frac{\partial\Theta}{\partial R}\right). \tag{15}$$

Диссипация тепловой энергии для асимметричного движения представляется так:

$$\Phi=2\left[\left(\frac{\partial\upsilon}{\partial r}\right)^2+\left(\frac{\upsilon}{r}n\right)^2+\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2\right]+\left[\frac{\partial\upsilon}{\partial z}+\frac{\partial u}{\partial r}\right]^2. \tag{16}$$

Генерация энтропии в безразмерной форме равна:

$$E_g=\left(\frac{\partial\Theta}{\partial Z}\right)^2+\left(\frac{\partial\Theta}{\partial R}\right)^2+(1-f)Br_m\left\{2\left[\left(\frac{\partial V}{\partial R}\right)^2+\left(\frac{V}{R}n\right)^2+\left(\frac{\partial U}{\partial Z}\right)^2\right]+\right.$$
$$\left.+\left[\frac{\partial V}{\partial Z}+\frac{\partial U}{\partial R}\right]^2\right\}+f\frac{Br_m}{D_a}\left[\overline{V}\right]^2. \tag{17}$$

В уравнениях (13 – 17) приняты обозначения:

$Z=z/z_{in}$; $U=u/u_{in}$; $V=v/v_{in}$; $R=r/r_{in}$; $\Theta=(T-T_{in})/T_w-T_{in}$; $P=p/p_{in}$; $\Theta=(T-T_{in})/T_w-T_{in}$; $P=p/p_{in}$; $D_a=k/r_0$ – число Дарси; $R_e=\rho\cdot u_{in}\cdot r/\mu$ – число Рейнольдса; Br_m – преобразованное число Брикмана.

Энтропийный метод анализа и концепция эксергоэкономической оптимизации получили особое развитие в последние два-три десятилетия благодаря научным работам А. Бежана и Т. Морозюк.

Выводы

Пористые среды играют существенную роль не только в технических областях, но и в природе, биологии и заслуживают всестороннего анализа. Следует отметить исключительную роль в исследований термобиологических явлений И. Пригожина и его научной школе [6 – 8].

Список литературы

1. Амерханов Р.А. Оптимизация сельскохозяйственных энергети-ческих установок с использованием возобновляемых видов энергии / Р.А.Амерханов.– М.: Колос, 2003. – 532 с.

2. Бекман Г. Тепловое аккумулирование энергии / Г.Бекман, П.Гилли – М.: Мир, 1987. – 272 с.

3. Долинский А.А. Оптимизация энергетических систем методом теоретико-графовых построений/А.А. Долинский, Б.Х. Драганов. – К.: Академпериодика, 2013. – 37 с.

4. Долинский А.А. Оптимизация энергоэкономической системы теплоснабжения при использовании возобновляемых источников энергии / А.А. Долинский, Б.Х. Драганов // Пром. теплотехника. – 2008. – Т. 30, № 1. – С. 5 – 9.

5. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В.Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 600 с.

6. Николис Г. Познание сложного / Г. Николис, И. Пригожин . – М.: Мир, 1990. – 342 с.

7. Николис Г. Самоорганизация в неравномерных системах/ Г. Николис, И. Пригожин. – М.: Мир, 1979. – 512 с.

8. Пригожин И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / И. Пригожин, Д. Кондепуди. – М.: Мир, 2008. – 462 с.

9. Тсатсаронис Дж. Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы./ Дж. Тсатсаронис. – Одесса: Студия «Негоциант», 2002. – 152 с.

10. Began A. Forma si structura de la energe la natura. – Bucuresti: Editura Agir, 2004. – 330 p.

11. Began A. Thevmal Designand Optimization /A. Began, G. Tsatsaronis, M. Moran // New York: J. Wiley, 1796. – 571 p.

12. A. Bejan entropy generation minimization in heat transfer. In: E. Sciubba. M. Moran (Eds.) second Law Analysis of Energy systems: toward the 21st century. Proceedings of International Conferences ROMA', 1995. – P. 363 – 372.

13. Draganov B.H. Complex use of Renewable/B.H. Draganov, L.A. Fara // Solar energy for Sustainable Development. 1995. – 4.– №1,2. – P.38-41.

14. J.Y. Jang, J.L. Chen Forced convection in a parallel plate channel partially filled with a high porosity medium. Int. Commun. Heat Mass Transfer 19 (1992). P. 263 – 273.

15. J.L. Lage, A. Narasimhan Porous media enhanced forced convection fundamentals and applications, in: K. Vafai, H.A. Hadim (Eds.), Handbook of Porous Media, Marcel Dekker, New York, 2000. 430 p.

16. G. Lauriant. R. Ghafir Forced convective transfer in porous media, in: K. Vafai, H.A. Hadim (Eds.), Handbook of porous Media, Marcel Dekker, New York, 2000.

17. A.A. Mohamad Heat transfer enhancements in heat exchangers fitted with porous media Part I: constant wall temperature. Int. J. Therm. Sci. 42 (2003). – P. 385 – 395.

18. T. Morosuk Porous media theory for fouling problems in heat exchangers of refrigeration machines and heat pumps, on current issues on heat and mass transfer in porous media, in: Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Porous Media, 9-20 June 2003, Neptun, Romania, 2003. – P. 406 – 416.

19. T.V. Morosuk Entropy generation in conduits filled with porous medium totally and partially/International Journal of Heat and Mass Transfer 48 (2005). – P. 2548 – 2560.

20. D. Poulikakos, M. Kazmierczak Forced convection in a duct partially filled with a porous material, ASME J. Heat Transfer 109 (1987). P. 653 – 662.

Проаналзіовано процес теплообміну в пористому середовищі. Досліджуваний процес передбачається осесиметричним і стаціонарним, його ефективність визначається за величиною виробництва ентропії.

Пористе середовише, теплообмін, дисипація теплової енергії, ступінь виробництва ентропії, функція Бесселя.

Analysis of the process of heat transfer in porous media. Learning process is supposed osimetrichnym and stationary. Investigated the effectiveness of the process is determined by the value of the entropy production.

Porous medium, heat transfer, heat dissipation, the degree of entropy production, the Bessel function.

УДК 004.896

ПРОГНОЗ ТА ОЦІНКА ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ РІЗНИХ ВИДІВ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ НА ТЕПЛИЧНИХ КОМПЛЕКСАХ

В.П. Лисенко, В.М. Решетюк, В.М. Штепа, А.О. Дудник,
кандидати технічних наук
Т.І. Лендєл, І.І. Чернов, аспіранти*

Проаналізовано динаміку зміни вартості альтернативних джерел енергії, оцінено актуальність створення прогностичних моделей вартості природного газ. Обґрунтовано застосування нейронних мереж для створення предиктів ціни природного газу. Вибрано багатошаровий персептрон як інструментарій для створення прогнозів щодо ціни природного газу. Оцінено структуру вартості виробництва томатів. Проаналізовано ступінь перспективності використання альтернативних джерел енергії на тепличних комплексах.

Нейронна мережа, багатошаровий персептрон, прогнозування, альтернативні джерела енергії.

Планування вартості енергоресурсів для великих підприємств дає можливість оцінювати майбутній його дохід та можливі варіанти розвитку в цілому. Очевидно, що за останній час для тепличних господарств найважливішим енергоресурсом став природний газ. Оскільки його ціна постійно змінюється, постає питання її адекватного прогнозування [3].

Разом із тим доцільно здійснити аналіз використання альтернативної енергетики на основі порівняння різних технологій її виробництва. Також, при аналізі оптимального вибору джерела енергії і способу її вироблення на

---

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