

Чирін Д.А.

Придніпровська державна академія будівництва та архітектури

Гродов В.Ф.

Дніпровський державний технічний університет

МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ВІД СОНЯЧНИХ ПЛІВКОВИХ КОЛЕКТОРІВ З ТЕПЛОВИМ НАСОСОМ

Розглядається система із сонячного колектора плівкового типу та тепловий насос. Данна система може застосовуватись у системах гарячого водопостачання та опалення. Метою даної роботи є математичне моделювання, розроблення алгоритму програми і комп'ютерне моделювання системи із сонячного колектора плівкового типу та теплового насоса, за змінних умов його функціонування. Створена схема взаємодії сонячного колектора плівкового типу з тепловим насосом та баком-акумулятором. Схема характеризується контрольними пунктами циркуляції теплоносія – води. Для математичного моделювання роботи сонячного колектора плівкового типу застосовувались наші попередні експериментальні результати з побудовою емпіричних залежностей. При цьому використані три безрозмірні комплекси, які характеризують вплив температури повітря на різницю температур початкової і кінцевої води, фізичні розміри сонячного колектора, ефективність цього колектора. Для математичного моделювання роботи теплового насоса у взаємодії з колектором використовувались результати експериментальних досліджень із літературних джерел, де розглядалась взаємодія сонячного колектора (але не плівкового типу) з тепловим насосом.

Розроблена математична модель системи теплопостачання із сонячними колекторами плівкового типу і тепловим насосом. Математична модель представлена у вигляді гідравлічного ланцюга з регульованими параметрами. Ділянки гідравлічного ланцюга моделюють теплові процеси, що відбуваються в системі, а вузли відображають закони збереження маси та енергії теплоносіїв. Розроблено алгоритм вирішення задачі аналізу для побудованого гідравлічного ланцюга у вигляді простого ітераційного процесу. Для наочності алгоритму представлена блок-схема комп'ютерного моделювання системи за змінних параметрів. Важлива роль у моделюванні відведена отриманню таких важливих характеристик системи теплопостачання, як витрати корисної теплової енергії та витрати механічної (електричної) енергії для теплового насоса. Результати моделювання свідчать про досить високу ефективність роботи даної системи теплопостачання. Показано, що остаточне рішення про прийнятний режим роботи системи може бути зроблено на основі рішення задачі Парето.

Ключові слова: сонячний колектор плівкового типу, система теплопостачання, тепловий насос, математичне та комп'ютерне моделювання системи, безрозмірні комплекси.

Постановка проблеми. Збереження енергоресурсів планети за рахунок використання нетрадиційних видів енергії дає можливість технічного прогресу, конкурентоспроможності промисловості та комфортного життєзабезпечення. Для забезпечення опалення та гарячого водопостачання широко використовують сонячні колектори або теплові насоси, а поєднання в системі сонячних колекторів і теплового насоса надає незаперечні переваги.

Сонячні колектори плівкового типу приваблюють своєю простотою та низькими капітальними витратами. Бажано дослідити ефективність взаємодії сонячних колекторів плівкового типу

та теплового насоса методами математичного та комп'ютерного моделювання, що раніше не робилось.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Модель сонячного колектора плівкового типу використовує сонячну енергію і нагріває рідинний теплоносіє, наприклад, воду. Серед різних типів колекторів розроблені сонячні колектори, які застосовують теплообмін у плівці рідини [1, с. 195]. У деяких дослідженнях [2, с. 235–237], [3, с. 12–15] викладені результати математичного моделювання сонячного колектора плівкового типу. У роботах [4–10] викладені результати математичного моделювання систем теплопостачання із сонячними

колекторами та тепловими насосами. Але взаємодія сонячного колектора плівкового типу та теплового насоса раніше не розглядалась.

Постановка завдання. Мета роботи – розробити математичну модель системи теплопостачання із сонячними колекторами плівкового типу та тепловим насосом; на основі комп’ютерного моделювання отримати оцінку ефективності взаємодії сонячних колекторів плівкового типу з тепловим насосом та вказати напрями вибору режимів роботи такої системи.

Виклад основного матеріалу дослідження. На основі розробленого сонячного колектора плівкового типу [1, с. 195] побудована схема системи теплопостачання з тепловим насосом та баком-акумулятором (рис. 1).

Теплоносій (вода) з початковою температурою в пункті 1 поступає в сонячний колектор плівкового типу (СК), після нагрівання отримуємо теплоносій у пункті 2 з відповідними характеристиками, далі теплоносій входить до зовнішнього контуру теплового насосу (НП) в пункті 3, охолоджується до відповідної температури в пункті 4 і повертається до системи СК у пункт 1. Внутрішній контур НП починається в пункті 5 з початковою температурою теплоносія, за рахунок енергії теплоносія від зовнішнього контуру відбувається нагрів теплоносія, і маємо гарячу воду в пункті 6, яка передається до бака-акумулятора в пункт 7. У нижній точці бака-акумулятора пункт 8 відбувається відбір холодного теплоносія. Пункти 9 та 10 – це подача і відбір теплоносія (води) до споживача.

Для моделювання роботи сонячного колектора використовувались безрозмірні комплекси у відповідності з [3, с. 12]:

$$p_1 = \frac{\Delta T}{T_{нов}}, \quad (1)$$

де ΔT – різниця температур води між входом та виходом сонячного колектора, $T_{нов}$ – температура повітря. Температурний комплекс p_1 характеризує вплив температури повітря на різницю температур початкової і кінцевої води.

$$p_2 = \frac{h^2}{F}, \quad (2)$$

де h – відстані між прозорою та сорбуючою поверхнями, F – площа сорбуючої поверхні. Другий комплекс характеризує фізичні розміри сонячного колектора.

$$p_3 = \frac{C_{вод} * G * \Delta T}{q_{сон} * F}, \quad (3)$$

де $C_{вод}$ – теплоємність води, G – витрати води, $q_{сон}$ – інтенсивність сонячної радіації. Третій безрозмірний комплекс характеризує ефективність сонячного колектора.

Для комплексу p_3 маємо залежність

$$f(p_1; p_2) = 0,51 - 0,295 \cdot p_1 + 0,0027 \cdot (1 - p_2) + 3,5 \cdot p_1^2 - 0,23 \cdot (1 - p_2)^2, \quad (4)$$

Для моделювання роботи теплового насосу використано результати [10, с. 67]. Температура теплоносія на виході теплового насоса визначається як регресійна залежність

$$T_6 = C1 + D1 * (T_3 - T_4), \quad (5)$$

де коефіцієнти регресійної залежності отримані за результатами роботи [10, с. 71] у вигляді $C1 = 32,5$; $D1 = 1,07$.

Значення коефіцієнту перетворення енергії в теплову енергію на виході теплового насоса

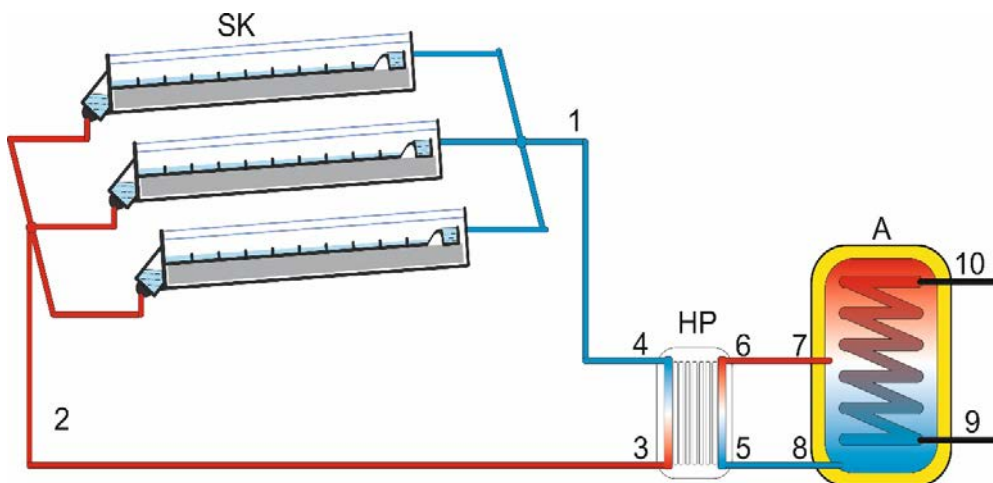


Рис. 1. Принципова схема взаємодії сонячного колектора плівкового типу з тепловим насосом та баком-акумулятором

визначається також за результатами роботи [10, с. 71] у вигляді

$$\text{COP} = 5.75 - 0.107 \cdot (T_3 - T_4), \quad (6)$$

де T_3 та T_4 – значення температур у відповідних точках принципової схеми (рис. 1) взаємодії сонячного колектора з тепловим насосом.

На рис. 2 зображено схему алгоритму обчислення характеристик системи:

Результати комп'ютерного моделювання режимів роботи системи теплопостачання з плівковими сонячними колекторами та тепловим насосом при $Q_{\text{sun}} = 200 \text{ Вт}$, $F = 1 \text{ м}^2$, $T_{\text{nach}} = 20^\circ\text{C}$ наведені нижче (у розрахунку на один колектор із системи сонячних колекторів).

$$V = 0.005 \text{ кг/с}$$

$$P_{11}, P_{12}, P_{13} = 0.1410858, 0.00043, 0.3109445$$

$$Q_{\text{NAGRinlet}}, D_{\text{Tinlet}}, T_1; T_2 = 62.1889, 2.961376, 20, 22.96138$$

$$T_6 = 34.59867$$

$$\text{COP} = 5.540133$$

$$Q_{\text{MEX}} = 13.6976$$

$$Q_{\text{NAGRoutlet}} = 75.8865$$

$$D_{\text{Toutlet}} = 3.613643$$

$$V = 0.007 \text{ кг/с}$$

$$P_{11}, P_{12}, P_{13} = 0.09498947, 0.00043, 0.2864552$$

$$Q_{\text{NAGRinlet}}, D_{\text{Tinlet}}, T_1; T_2 = 57.29104, 1.948675, 20, 21.94868$$

$$T_6 = 33.51508$$

$$\text{COP} = 5.648492$$

$$Q_{\text{MEX}} = 12.32465$$

$$Q_{\text{NAGRoutlet}} = 69.61569$$

$$D_{\text{Toutlet}} = 2.367881$$

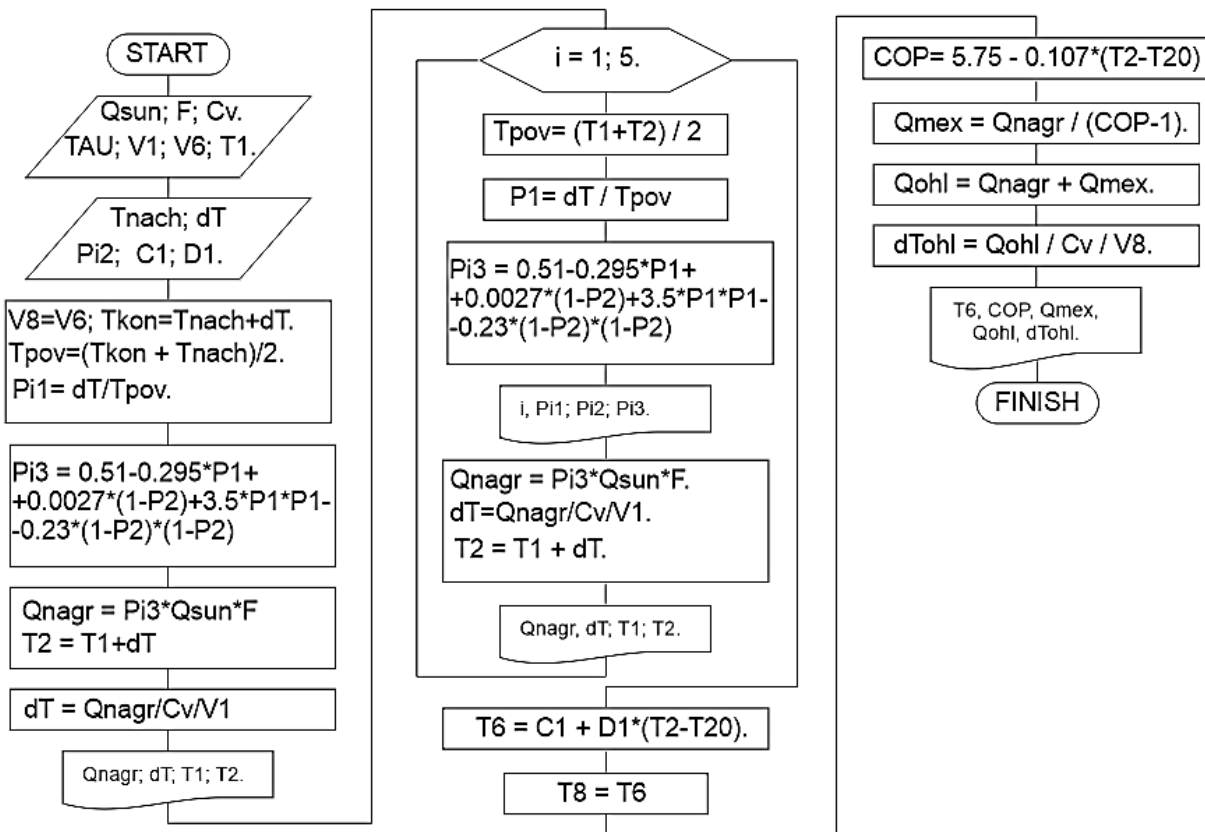


Рис. 2. Алгоритм обчислення характеристик системи

де: Q_{sun} – інтенсивність сонячного випромінювання;

F – площа поверхні колектору;

C_v – теплоємність води;

TAU – інтервал часу;

$V(i)$ – обсяг води в (i) пункті;

T_{nach} – початкова температура води в сонячному колекторі;

T_{kon} – кінцева температура води в сонячному колекторі;

dT – різниця температур;

P_1, P_2, P_3 – безрозмірні комплекси.

$V = 0.003$ кг/с
 $PI1, PI2, PI3 = 0.2826929, 0.00043, 0.4792056$
QNAGRinlet; DTinlet; T1; T2= 95.84113,
7.606439, 20, 27.60644
T6 = 39.56889
COP = 5.043111
QMEX = 23.7048
QNAGRoutlet = 119.5459
DToutlet = 9.487771

З результатів комп'ютерного моделювання можна побачити, що збільшення циркуляції теплоносія в контурі подачі сонячного колектора призводить до збільшення отримання корисної теплової енергії, а також одночасно до збільшення витрат механічної енергії, що використовуються тепловим насосом. Таким чином, ці важливі критерії роботи системи «сонячний колектор плівкового типу та тепловий насос» знаходяться в протиріччі: бажання отримати більше корисної теплової енергії в результаті роботи такої системи стикається з більшими витратами механічної (електричної) енергії для теплового насоса компресійного типу. Приймати керуюче рішення щодо режиму роботи

системи можливо в результаті рішення задачі багатокритеріальної оптимізації, використовуючи, наприклад, алгоритм багатокритеріальної оптимізації за наявності бінарних відношень вибору [11].

Висновки. Розроблена математична модель роботи системи тепlopостачання від сонячних колекторів плівкового типу та теплового насосу. Для сонячних колекторів плівкового типу застосовувались результати експериментального дослідження та моделювання роботи сонячного колектора плівкового типу. Для моделювання взаємодії теплового насоса із сонячними колекторами використовувались результати моделювання з літературних джерел. Виконане комп'ютерне моделювання, яке показало наявність двох вихідних критеріїв роботи такої системи тепlopостачання. Показано, що бажання отримати більше корисної теплової енергії в результаті роботи такої системи стикається з більшими витратами механічної (електричної) енергії для теплового насоса компресійного типу. Приймати остаточне керуюче рішення щодо режиму роботи системи можливо в результаті рішення задачі багатокритеріальної оптимізації (рішення Парето).

Список літератури:

1. Чирін Д.А., Іродов В.Ф., Чорнойван А.А. Експериментальні дослідження сонячного колектору плівкового типу. *Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського*. Київ, 2019. № 30 (69). С. 194–198.
2. Чирин Д.А., Іродов В.Ф. Математическое моделирование системы теплоснабжения потребителя с использованием солнечного коллектора пленочного типа. *Строительство, материаловедение, машиностроение* : сб. науч. тр. Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры. Днепро, 2017. Вып. 101. С. 234–238.
3. Chirin D.A., Irodov V.F. Creation mathematical model of a film solar collector using evolutionary search. *East European Scientific Journal*. 2019. 51 (4): 11–17.
4. Li PX., Rong WG. Study of the characteristics of compressor in waster source heat pump set under variant operating conditions. *Refrigeration and Air Condition*. 2003. 3 (2): 1–4. (in Chinese).
5. Long J, Huang S. Study on energy efficiency evaluation method of cooling water system of surface water source heat pump. *LectureNotes in Electrical Engineering*. 2014. 262: 333–340.
6. Evaluation of the performance of a centralized ground-water heat pump system in cold climate region / S. Lu et al. *Frontiers in Energy*. 2014. 8: 394–402.
7. Jin H. Parameter estimation based on model of water source heatpumps. PhD Thesis, Oklahoma State University, USA, 2002.
8. Jie JH. Simplified calculation of horizontal shell and tube condenser. *Fluid Machinery*. 1994. 9 (22): 61–63. (in Chinese).
9. New optimized model for water temperature calculation of river-water source heat pump and its application in simulation of energy consumption / P. Si et al. 2015. *Renewable Energy*. 84: 65–73.
10. Simulation and analysis on thermodynamic performance of surface water source heat pump system / Lv. Nan et al. BUILD SIMUL. 2017. 10: 65–73.
11. Irodov V.F., Chornomorets G.Y., Barsuk R.V. Multiobjective Optimization at Evolutionary Search with Binary Choice Relation. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2020. № 56 (3). 449–454.

Chirin D.A., Irodov V.F. MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING OF HEAT SUPPLY SYSTEM FROM SOLAR FILM COLLECTORS WITH HEAT PUMP

A film-type solar collector system and a heat pump are considered. This system can be used in hot water supply and heating systems. The aim of this work is mathematical modeling, development of the program algorithm and computer modeling of the system from a film-type solar collector and a heat pump, under

changing conditions of its operation. A scheme of interaction of a film-type solar collector with a heat pump and a storage tank has been created. The scheme is characterized by control points of circulation of the heat carrier - water. Three dimensionless complexes that characterize the effect of air temperature on the temperature difference between the initial and final water, the physical size of the solar collector, the efficiency of the solar collector. For mathematical modeling of the heat pump in interaction with the collector, the results of experimental studies from literature sources were used, where the interaction of the solar collector (but not the film type) with the heat pump was considered. A mathematical model of the heat supply system with film-type solar collectors and a heat pump has been developed. The mathematical model is presented in the form of a hydraulic chain with adjustable parameters. The sections of the hydraulic circuit simulate the thermal processes occurring in the system, and the nodes reflect the laws of conservation of mass and energy of heat carriers. An algorithm for solving the analysis problem for the constructed hydraulic circuit in the form of a simple iterative process is developed. For clarity of the algorithm, a block diagram of computer modeling of the system with variable parameters is presented. An important role in the modeling is given to obtaining such important characteristics of the heat supply system as the consumption of useful thermal energy and the consumption of mechanical (electrical) energy for the heat pump. The simulation results indicate a fairly high efficiency of the considered heat supply system. It is shown that the final decision on the adopted mode of operation of the system can be made on the basis of the solution of the Pareto problem.

Key words: *film-type solar collector, heat supply system, heat pump, mathematical and computer modeling of the system, dimensionless complexes.*