

УДК 004.942:697

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЛНЕЧНОГО КОЛЛЕКТОРА ПЛЕНОЧНОГО ТИПА

ЧИРИН Д. А.^{1*}, аспирант,
ИРОДОВ В. Ф.^{2*}, д.т.н, проф.

^{1*} Кафедра системного анализа и моделирования в теплогазоснабжение, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепр, Украина, тел. +38 (095) 235-19-73, e-mail: dmitryanich@gmail.com

^{2*} Кафедра системного анализа и моделирования в теплогазоснабжение, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепр, Украина, тел. +38 (056) 756-34-06, e-mail: vfirodov@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-8772-9862

Аннотация. Цель. Для выбора оптимальных параметров конструкции и подбора характеристик солнечного коллектора пленочного типа, необходимо разработать математическую модель всей системы теплоснабжения с солнечными коллекторами, как модель гидравлической цепи с неизотермическим течением, и составить математическую модель движения жидкости в солнечном коллекторе пленочного типа, а так же математическую модель аккумулятора тепла и теплового насоса. Определить виды подходящего оборудования для основного теплогенерирующего устройства и для потребителей тепла. **Результаты.** Дана характеристика работы системы теплоснабжения с несколькими источниками тепла. Составлена схема и граф системы теплоснабжения. Предложены варианты оборудования для системы теплоснабжения и конструкция солнечного коллектора пленочного типа. **Практическая значимость.** Результаты решения оптимальных параметров солнечных коллекторов обеспечат экономию энергоресурсов и дадут положительный эффект для проектирования систем теплоснабжения с дополнительными источниками тепла.

Ключевые слова: солнечные коллекторы пленочного типа; системы теплоснабжения; математическое моделирование

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ СПОЖИВАЧА З ВИКОРИСТАННЯМ СОНЯЧНОГО КОЛЕКТОРА ПЛІВКОВОГО ТИПУ

ЧИРИН Д. А.^{1*}, аспірант,
ИРОДОВ В. Ф.², д.т.н, проф.

^{1*} Кафедра системного аналізу та моделювання у теплогазопостачанні, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 235-19-73, e-mail: dmitryanich@gmail.com

² Кафедра системного аналізу та моделювання у теплогазопостачанні, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-06, e-mail: vfirodov@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-8772-9862

Анотація. Мета. Для вибору оптимальних параметрів конструкції і підбору характеристик сонячного колектора плівкового типу, необхідно розробити математичну модель всієї системи теплопостачання з сонячними колекторами, як модель гідравлічної ланцюга з неизотермічним плином, і скласти математичну модель руху рідини в сонячному колекторі плівкового типу, а також математичну модель аккумулятора тепла і теплового насоса. Визначити види відповідного обладнання для основного теплогенеруючого пристрою і для споживачів тепла. **Результати.** Дана характеристика роботи системи теплопостачання з декількома джерелами тепла. Складено схему та граф системи теплопостачання. Запропоновано варіанти обладнання для системи теплопостачання і конструкція сонячного колектора плівкового типу. **Практична значимість.** Результати рішення оптимальних параметрів сонячних колекторів забезпечать економію енергоресурсів і дадуть позитивний ефект для проектування систем теплопостачання з додатковими джерелами тепла.

Ключові слова: сонячні колектори плівкового типу; системи теплопостачання; математичне моделювання

MATHEMATICAL MODELING OF THE CONSUMER HEAT SUPPLY SYSTEM USING THE FILM TYPE SOLAR COLLECTOR

CHIRIN D. A.^{1*}, *post-graduate student*,
IRODOV V. F.^{2*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

^{1*} Department of System Analysis and Modeling in Heat and Gas Supply, State Higher Education Establishment “Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, Chernishevskogo str., 24-A, Dnipro 49600, Ukraine, phon. +38 (095) 235-19-73, e-mail: dmitryanich@gmail.com

^{2*} Department of System Analysis and Modeling in Heat and Gas Supply, State Higher Education Establishment “Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, Chernishevskogo str., 24-A, Dnipro 49600, Ukraine, phon. +38 (056) 756-34-06, e-mail: vfirodov@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-8772-9862

Abstract. Purpose. To select optimal design parameters and calculate the characteristics of a film-type solar collector, it is necessary to develop a mathematical model of the entire heat supply system with solar collectors, as a model of a hydraulic circuit with nonisothermal flow, and to compile a mathematical model of fluid motion in a solar collector of film type. **Findings.** The characteristics of the heat supply system with several heat sources are given. The scheme and graph of the heat supply system is made. The variants of the equipment for the heat supply system and the design of the solar collector of the film type are proposed. **Practical value.** For the design of tube gas heaters in structures needed to find optimal design parameters, such as capital and operating costs, efficiency and the others. Results for solving the problem of synthesis gas tube heaters in structures provide a positive impact on the optimal design of these systems. When looking for optimal solutions of the system proposed to use an evolutionary algorithm to find solutions. Results of the solution of this problem will provide positive effects for the design of these heaters.

Keywords: collectors of film type; heat supply systems; math modeling

Введение

Для системы теплоснабжения составлен граф движения теплоносителя, на основе которого формируется математическая модель системы.

Цель

Цель данной статьи сформулировать задачу математического моделирования системы теплоснабжения в целом и математические модели теплового насоса, аккумулятора тепла и солнечного коллектора пленочного типа в частности.

Методика

В статье выполнено математическое моделирование процесса теплоснабжения потребителя с использованием солнечного коллектора пленочного типа.

Принципиальная схема теплоснабжения потребителя представлена на рис. 1

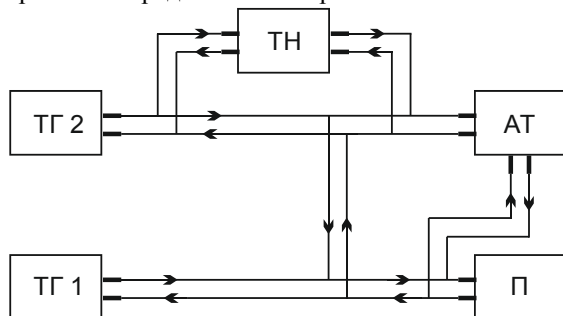


Рис. 1 Схема тепло снабжения потребителя / Diagram of heat supply consumer

ТГ1 – теплогенерирующее устройство стационарного типа,

ТГ2 – солнечный коллектор пленочного типа,

ТН – тепловой насос,

АТ – аккумулятор тепла,

П – потребитель тепла.

В системе теплоснабжения теплоноситель – вода при относительно низком перепаде температур, например, 50/30. Система теплоснабжения предназначена для целей отопления потребителя и горячего водоснабжения. Основным теплоисточником работает за счет энергии – химической (возобновляемых или не возобновляемых источников) или электрической. Он полностью обеспечивает достижение необходимого перепада температур. Теплоисточник с солнечным коллектором может обеспечить достижение температуры в подающем трубопроводе при благоприятных условиях работы, а может и не обеспечивать. Для того, чтобы все-таки использовать этот теплоисточник при относительно неблагоприятных условиях в системе теплоснабжения предусматривается тепловой насос. Тепловой насос использует тепловую энергию с относительно низкой температурой (ниже 50 град.) и за счет дополнительной энергии поднимает температуру теплоносителя до 50 °С.

Один из возможных вариантов построения системы теплоснабжения – это объединение основного теплоисточника и теплового насоса в одно целое. Такой теплоисточник – тепловой насос компрессионного или абсорбционного типа, который использует энергию электрическую или механическую для привода компрессора или химическую (возобновляемых или не

возобновляемых источников энергии) для теплового насоса абсорбционного типа.

При слабой интенсивности солнечного излучения, солнечный коллектор (ТГ2) не способен выйти на полную мощность для подачи теплоносителя с необходимой температурой напрямую потребителю (П), для этого предусмотрен тепловой насос (ТН). В случае высокой интенсивности солнечного излучения, избыточное тепло накапливается в аккумуляторе тепла (АТ), при отсутствии солнечного излучения, в первую очередь используется накопленное тепло в АТ и только затем задействуется теплогенерирующее устройство (ТГ1), так же в системе теплоснабжения возможна одновременная работа ТГ1 как основного и ТГ2 как дополнительного устройства. Солнечные коллекторы пленочного типа являются низкотемпературными устройствами, поэтому для стабильной работы всей системы предлагается использовать оборудование на основе низкотемпературного теплоносителя, для ТГ1 это могут быть конденсационные котлы, а для потребителя фанкойлы.

Схема теплоснабжения в виде графа гидравлической цепи представлена на рис.2

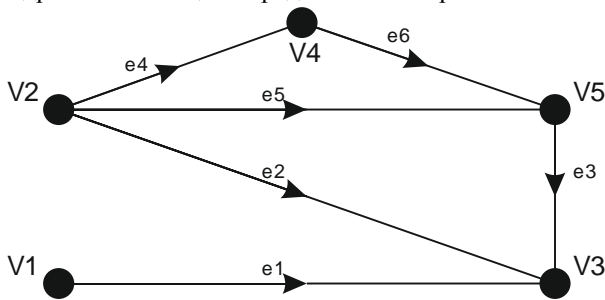


Рис. 2 Граф схемы теплоснабжения гидравлической цепи / Heat supply diagram of hydraulic chain

V_i - вершины цепи, соответствующие схеме теплоснабжения,

e_j - ребра, соответствующие участкам трубопровода.

Матрица инцидентий $A = \{a_{ij}\}$, у которой $a_{ij} = 1$, если вершина V_i инцидентна ребру e_j и $a_{ij} = 0$ в противоположном случае.

Первый закон Киргофа в матричной форме:

$$A \times V + Q = 0 \quad (1)$$

Уравнение второго закона Кирхгофа для контуров сети имеет вид

$$B \cdot H = 0 \quad (2)$$

где A, B - матрица соединений и контуров цепи соответственно; $V = \{v_i\}$ - вектор расхода по участкам; $Q = \{Q_i\}$ - заданные узловые расходы;

Потери давления на i -м участке

$$h_i = \int_0^{l_i} dP_i \cdot dz_i \quad (3)$$

где: z_i - длина i -го участка.

Перепад давления по участкам в зависимости от расхода v_i , температуры T_i , плотности ρ_i и скорости w_i :

$$dP_i(z_i) = \psi_i(v_i, T_i(z_i), \rho_i(z_i), w_i(z_i), dT_i, d\rho_i, dw_i) \quad (4)$$

где: v_i - расход теплоносителя в канале на i -м участке; $w_i(z_i)$ - скорость движения в середине канала на i -м участке; $T_i(z_i)$ - температура в середине канала на i -м участке; $\rho_i(z_i)$ - плотность теплоносителя в середине канала на i -м участке.

Уравнение баланса энергии для узлов цепи:

$$\sum_{i \in I_{вход}} v_i(l_i) \cdot C_{P_i} T_i(l_i) = \sum_{i \in I_{выход}} v_i(0) \cdot C_{P_i} T_i(0), j \in J \quad (5)$$

где: $I_{вход}$ - множество участков входящих в узел j ; $I_{выход}$ - множество участков выходящих из узла j ; C_{P_i} - теплоемкость теплоносителя при постоянном давлении, Дж/кг °С.

Ограничения на допустимые значения скорости и температуры соответственно:

$$w_i(z_i) \leq w_i^{don}(z_i) \quad (6)$$

$$T_i(z_i) \leq T_i^{don}(z_i) \quad (7)$$

где: $w_i^{don}(z_i)$ - допустимая скорость движения в канале на i -м участке, м/с; $T_i^{don}(z_i)$ - допустимая температура в канале на i -м участке, °С.

В солнечном коллекторе пленочного типа, жидкость поступает в верхнюю часть коллектора где преобразователем потока распределяется по всей поверхности и пленкой стекает по абсорберу под действием силы тяжести рис3. Такой способ распределения жидкости наиболее эффективен и не требует мощного насосного оборудования, следовательно повышает надежность конструкции и снижает затраты на обслуживание. В качестве теплоносителя предлагается использовать предварительно подготовленную воду, как наиболее доступный вариант, подходящий по своим физико-химическим свойствам.

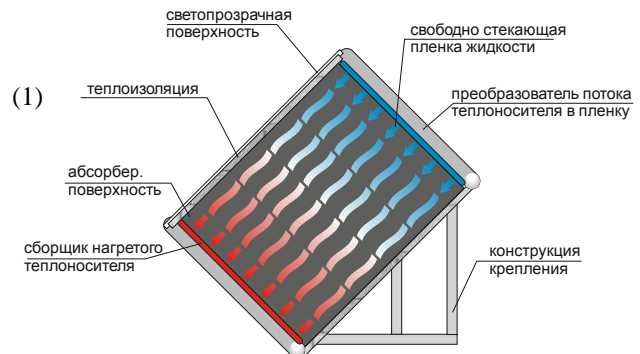


Рис. 3 Устройство солнечного коллектора пленочного типа / Sunny collector device of film type

Солнечное излучение, проходя сквозь светопрозрачную поверхность (стекло или

прозрачные виды пластика), попадает на абсорбирующую поверхность плоского типа, покрытую селективным слоем или черной краской. Абсорбер поглощая солнечное излучение нагревается и отдает тепловую энергию конвективным путем пленке жидкости, свободно стекающей по абсорберу, часть солнечного излучения будет отражена или поглощена светопрозрачной поверхностью и пленкой жидкости, часть тепловой энергии будет потеряна через ограждающие конструкции солнечного коллектора. Для уменьшения тепловых потерь рекомендуется использовать влагостойкий теплоизоляционный материал, для увеличения количества преобразованной лучистой энергии солнца в тепловую, рекомендуется использовать влагостойкое селективное покрытие с высоким коэффициентом светопоглощения, для более интенсивной передачи тепловой энергии от абсорбера к пленке жидкости, необходимо предусмотреть шероховатость или рефренную поверхность абсорбера, которая вызывает турбулентные завихрения в жидкости.

Математическая модель плоского турбулентного движения вязкой жидкости по наклонной плоскости:

$$\begin{aligned} \rho \left(\bar{v}_x \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial x} + \bar{v}_z \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial z} \right) &= \frac{\partial}{\partial x} (\bar{\tau}_{xx} + R_{xx}) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\tau}_{zx} + R_{zx}) + \rho F_x, \\ R_{xx} &= -\rho \bar{v}_x'^2, \\ R_{zx} &= -\rho \bar{v}_x' \bar{v}_z', \\ \rho \left(\bar{v}_x \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial x} + \bar{v}_z \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial z} \right) &= \frac{\partial}{\partial x} (\bar{\tau}_{xz} + R_{xz}) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\tau}_{zz} + R_{zz}) + \rho F_z, \\ R_{xz} &= R_{zx}, \\ \bar{\tau}_{xx} &= -\bar{p} + 2\mu \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial x}, \\ \bar{\tau}_{xz} &= \mu \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial z} + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial x} \right), \\ \bar{\tau}_{zz} &= -\bar{p} + 2\mu \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial z}. \end{aligned} \tag{8}$$

где \bar{p} - осредненное гидродинамическое давление, функции R_{xx}, R_{xz}, R_{zz} - добавочные напряжения Рейнольдса, представляющие суммарный эффект беспорядочный отклонений скоростей v'_x, v'_z от их средних значений, функции $\rho \bar{v}_x'^2, \bar{v}_x, \bar{v}_z : v_x = \bar{v}_x + v'_x, v_z = \bar{v}_z + v'_z$

Уравнение полезной тепловой энергии вырабатываемой солнечным коллектором

$$Q_U = A_C [I \eta_O - U_L (T_{pm} - T_a)] = m C_p (T_o - T_i) \tag{10}$$

где: A_C - площадь поверхности коллектора, м²; I - плотность потока солнечного излучения, поступающего на поверхность коллектора, Вт/м²; η_O - эффективный КПД коллектора; U_L - общий коэффициент тепловых потерь коллектора, Вт/(м² К); T_{pm} - средняя температура абсорбера, °С; T_o и T_i - температура теплоносителя на выходе и на входе в коллектор, °С; T_a - температура наружного воздуха, °С; m - массовый расход теплоносителя через коллектор, кг/с; C_p - удельная изобарная теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг °С).

Для составления математической модели теплового насоса, используем зависимость теплопроизводительности q_{wp} и коэффициент преобразования ε от температуры испарения и конденсации:

$$q_{wp} = f(T_H, T_K); \varepsilon = f(T_H, T_K) \tag{11}$$

где: T_H, T_K - температура в испарителе и конденсаторе ТН.

Тепловая емкость аккумулятора тепла определяется по выражению

$$Q_{sw} = (m C_p) \Delta T_S \tag{12}$$

где: Q_{sw} - общая тепловая емкость аккумулятора тепла для всего рабочего температурного диапазона ΔT_S ; m - масса теплоносителя в аккумуляторе тепла, кг; C_p - удельная теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг °С).

Баланс тепловой энергии в аккумуляторе тепла

$$Q_{sw} = Q_U - Q_{dhw} - Q_{uas} \tag{13}$$

где: Q_U и Q_{dhw} - показатели накопления и расхода тепловой энергии, кДж; Q_{uas} - потери тепла из аккумулятора тепла, кДж.

Результаты

Представлен один из вариантов схем теплоснабжения, где в качестве основного источника тепла используется конденсационный котел, а дополнительного - солнечный коллектор пленочного типа в паре с тепловым насосом и аккумулятором тепла и составлен граф. Предложен тип оборудования для работы с низкотемпературным теплоносителем. Дана характеристика процесса распределения и движения жидкости по наклонной плоскости под действием силы тяжести и предложен вариант конструкции солнечного коллектора пленочного типа как дополнительного

теплогенерирующего устройства в паре с тепловым насосом и аккумулятором тепла.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волошин О. Ф. Модели та методи прийняття рішень : навчальний посібник / О. Ф. Волошин, С. О. Мащенко. – Київ : Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2010. – 336 с.
2. Макаров И.М. Теория выбора и принятия решений : учебное пособие / И. М. Макаров, Т. М. Виноградская, А. А. Рубчинский, В. Б. Соколов. – Москва : Наука, 1982. – 330 с.
3. Потетюнко Э.Н. Турбулентное стекание вязкой жидкости по наклонной плоскости / Э.Н. Потетюнко // Электронный журнал: Современные наукоемкие технологии. 2010. - №9 – С.182-187.
4. Хасилев В.Я. Методы и алгоритмы расчета тепловых сетей / В.Я. Хасилев, А.П. Меренков, Б.М. Каганович. – Москва : Энергия, 1978 – 176с.
5. Чемяков В.В. Построение математической модели системы автономного теплоснабжения на базе теплового насоса / В.В. Чемяков // Научный журнал: Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2012. - С.167-172.
6. Чорноморець Г. Я. Математичне моделювання трубчастих газових нагрівачів, розташованих у будівельних конструкціях / Г. Я. Чорноморець, В. Ф. Іродов // Науковий вісник будівництва : зб. наук. пр. / Харків. нац. ун-т буд-ва та архітектури. – Харків, 2012. – Вип. 68. – С. 395-399.
7. Юдин Д.Б. Вычислительные методы теории принятия решений / Д.Б. Юдин. - М.: Наука, 1989. - 320 с.
8. Irodov V. Self-organization methods for analysis of nonlinear systems with binary choice relations / V. Irodov // Journal Systems Analysis Modeling Simulation. - Newark, NJ, USA Inc: Gordon and Breach Science Publishers, 1995.- Vol. 18-19, 1995. – pp. 203 – 206.

REFERENCES

12. Voloshin O.F. and Mashchenko S.O. *Modeli ta metody pryiniattia rishen* [Models and methods of decision-making]. Kyiv: Kyivskiy universitet Publ., 2010, 336 p. (in Ukrainian).
13. Makarov I.M., Vinogradskaya T.M., Rubchinskiy A.A. and Sokolov V.B. *Teoriia vybora i priniattia resheniy* [The theory of choice and decision-making], Moscow: Nauka Publ., 1982, 330 p. (in Russian).
14. Potetiunko E.N. *Turbulentnoye stekaniye viazkoy zhidkosti po naklonnoy ploskosti* [Turbulent flow of a viscous liquid along an inclined plane]. *Sovremennyye naukoemye tekhnologii*. *Elektonnyy zhurnal* [Modern high technologies. El. Journal] . 2010, no.9, pp.182-187. (in Russian).
15. Hasilev V.Y. *Metody i algoritmy rascheta teplovykh setey*. [Methods and algorithms for calculating thermal networks]. Moscow : *Energiya* [Moscow: Energy], 1978, p.176 (in Russian).
16. Chemekov V.V. *Postroeniye matematicheskoy modeli sistemy avtonomnogo teplosnabzheniia na baze teplovogo nasosa*. [Mathematical model of an autonomous heat supply system based on a heat pump] *Nauchno-tekhmicheskiye vedomosti SPbPU. Estestvennyye i inzhenernyye nauki*. [Scientific and technical bulletins. Natural and Engineering Sciences], 2012, pp.167-172. (in Russian).
17. Chornomorets H.Ya. and Irodov V.F. *Matematychni modeliuvannia trubchastykh ghazovykh nahrivachiv, roztashovanykh u budivelynykh konstrukttsiyakh* [Mathematical modeling tube gas heaters located in building structures]. *Naukovyy visnyk budivnytstva : Zb. nauk. prats* [Scientific Bulletin construction: Coll. Science works], 2012, issue 68, pp. 395–399. (in Ukrainian).
18. Yudin D.B. *Vychislitelnyye metody teorii priniattia resheniy* [Computational methods of decision theory]. Moscow: Nauka Publ., 1989, 320 p. (in Russian).
19. Irodov V.F. Self-organization methods for analysis of nonlinear systems with binary choice relations. *Soviet J. Journal Systems Analysis Modeling Simulation*. Newark, NJ, USA, 1995, issue 18-19, pp. 203–206.