DOI: 10.17117/na.2015.09.865

<http://ucom.ru/doc/na.2015.09.865.pdf>

Поступила (Received): 19.09.2015

**Федоров С.С., Сидоров И.Ю., Труханов И.П.,
Яргункин Д.В., Хазеев Т.Р.
Распределение тепловой энергии в системе
теплоснабжения с позиции энергосбережения**

**Fedorov S.S., Sidorov I.Yu., Trukhanov I.P.,
Yargunkin D.V., Hazeev T.R.
Distribution of thermal energy in system of heat
supply from an energy saving position**

В статье анализируется распределение тепловой энергии в системе теплоснабжения при стационарном режиме работы. Выявлена необходимость применения автоматизированных систем управления процессом теплоснабжения. Рассмотрено применение дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка для решения задач энергосбережения

Ключевые слова: теплоснабжение, энергосбережение, автоматизация, распределение тепла

In article distribution of thermal energy in system of heat supply at a stationary operating mode is analyzed. Need of application of automated control systems for process of heat supply is revealed. Application is considered the differential equations in private derivatives of the second order for the solution of problems of energy saving

Key words: heat supply, energy saving, automation, distribution of heat

Федоров Сергей Сергеевич

Преподаватель
Юго-Западный государственный университет
г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

Fedorov Sergey Sergeyevich

Teacher
Southwest state university
Kursk, 50 years of October st., 94

Сидоров Игорь Юрьевич

Начальник отделения
Центр научно-исследовательских и
производственных работ, БАШНЕФТЕГЕОФИЗИКА
г. Когалым, ул. Центральная, 19

Sidorov Igor Yuryevich

Head of Department
Center of research and production works,
BASHNEFTEGEOFIZIKA
Kogalym, Tsentralnaya st., 19

Труханов Илья Петрович

Эксперт
Центр научно-исследовательских и
производственных работ, БАШНЕФТЕГЕОФИЗИКА
г. Когалым, ул. Центральная, 19

Trukhanov Ilya Petrovich

Expert
Center of research and production works,
BASHNEFTEGEOFIZIKA
Kogalym, Tsentralnaya st., 19

Яргункин Дмитрий Владимирович

Эксперт
Центр научно-исследовательских и
производственных работ, БАШНЕФТЕГЕОФИЗИКА
г. Когалым, ул. Центральная, 19

Yargunkin Dmitry Vladimirovich

Expert
Center of research and production works,
BASHNEFTEGEOFIZIKA
Kogalym, Tsentralnaya st., 19

Хазеев Тимур Риннатович

Эксперт

Центр научно-исследовательских и
производственных работ, БАШНЕФТЕГЕОФИЗИКА
г. Когалым, ул. Центральная, 19

Hazeev Timur Rinnatovich

Expert

Center of research and production works,
BASHNEFTEGEOFIZIKA
Kogalym, Tsentralnaya st., 19

Проблемы энергосбережения в процессе выработки, транспортировки, распределения и потребления тепловой энергии в зданиях и сооружениях известны давно [1, 2]. Учитывая постоянно растущие цены на энергоносители задача снижения энергозатрат на теплоснабжение является актуальной. Создание новых и оптимизация уже использующихся систем автоматического управления теплоснабжением зданий и сооружений реализует поставленную задачу.

Теоретические исследования динамических свойств системы централизованного теплоснабжения с зависимым подключением тепловой нагрузки носят решающий характер для создания соответствующих механизмов управления [3, 4]. Предварительно отметим, что будем вести рассуждение для типоразмера стальных тонкостенных электросварных труб с отношением внутреннего и внешнего диаметров $\frac{d_1}{d_2} < 0,98$, ГОСТ 10704-91.

Предназначаемая математическая модель основана на законах тепломассопереноса. Предполагается, что на исследуемом участке внутри горизонтальной цилиндрической трубы присутствует сплошная непрерывная среда (нагретая вода), характеристики процессов переноса которой являются непрерывными функциями координат и времени. При решении нестационарных задач вынужденного конвективного теплообмена используется дифференциальное уравнение переноса теплоты в движущейся среде с известной скоростью:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial t}{\partial x} + w_y \frac{\partial t}{\partial y} + w_z \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{\lambda}{c\rho} \Delta t + \frac{Q_v - Q}{c\rho}, \quad (1)$$

где $\Delta t = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа в прямоугольной системе координат;

t – температура теплоносителя, °С; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С; c и ρ – соответственно теплоемкость и плотность теплоносителя, Дж/кг·°С и кг/м³; x, y, z – координаты в прямоугольной системе координат, м; w_x, w_y, w_z – проекции вектора скорости теплоносителя, м/с; Q_v, Q – соответственно интенсивности внутренних источников и тепловых потерь охлажденного теплоносителя, Дж/с·м³; τ – время, с.

Рассмотрим стационарный режим работы системы трубопроводов (расход и температура рабочего тела в нормальном сечении неизменные, движение потока жидкости направлено вдоль оси OX, $w_x = \text{const}$, (рис. 1).

Рис. 1. Перенос теплоты в движущейся среде с постоянной скоростью W_x

В этом случае в дифференциальном уравнении (1) справедливы соотношения $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$, $w_y = w_z = 0$. Учитывая, что величина Q_v в теплоносителе практически отсутствует, уравнение (1) резко упрощается:

$$w_x \frac{\partial t}{\partial x} = \frac{\lambda}{c_p} \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} - \frac{Q}{c_p} \quad (2)$$

Преобразуем (2) к виду:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} - w_x \frac{c_p}{\lambda} \cdot \frac{\partial t}{\partial x} - \frac{Q}{\lambda} = 0, \quad (3)$$

где граничные условия задаются значениями: $t = t_1$ при $x = 0$, $t = t_2$ и $x = \ell$; t_1, t_2 – соответственно температуры теплоносителя на входе в подающий и на выходе из обратного трубопроводов, °C.

Согласно [3] величина Q определяется по формуле:

$$Q = k_{тр} \pi d_x \ell (t - t_k), \quad (4)$$

где t, t_k – соответственно температура теплоносителя (горячей воды) и температура воздуха в отапливаемом помещении (тепловой нагрузке), °C; ℓ – длина контура трубопровода тепловой нагрузки, м; $\pi \approx 3,14159$; $k_{тр}$ – коэффициент теплопередачи контура трубопровода к тепловой нагрузке, Вт/м²·°C; d_x – эффективный диаметр трубопровода, м;

Следует отметить, что $k_{тр}$ определяется по формуле:

$$k_{тр} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda_{тр}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (5)$$

где α_1, α_2 – соответственно коэффициенты теплоотдачи от теплоносителя к трубопроводу и от трубопровода к тепловой нагрузке, Вт/м²·°C; δ – толщина стенок трубопровода, м; $\lambda_{тр}$ – коэффициент теплопроводности материала трубопровода, Вт/м·°C.

Величина d_x выбирается в зависимости от соотношения между величинами α_1 и α_2 при условии, что $\alpha_1 \gg \alpha_2$, ($\alpha_1 = 5000 \div 5000$ Вт/м²·°C; $\alpha_2 = 10 \div 50$ Вт/м²·°C) по формуле:

$$d_x = d_z \quad (6)$$

Коэффициенты теплоотдачи λ_1 и λ_2 определяются соответственно по формуле:

$$\alpha_i = \frac{\overline{NU}_{ж,d} \lambda_i}{d_i}, \quad (7)$$

где $i=1,2$; λ_i – соответственно коэффициенты теплопроводности горячей воды и воздуха в обогреваемом помещении, Вт/м·°C; $\overline{NU}_{ж,d}$ – критерий Нуссельта для турбулентно текущей горячей воды в трубопроводе круглого сечения, причем:

$$\overline{NU}_{ж,d} = 0,021 Re_{ж,d}^{0,8} Pr_{ж}^{0,43} (Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25} \bar{\epsilon}_e, \quad (8)$$

где $Re_{ж,d}$ – критерий Рейнольдса для горячей воды в трубопроводе ($Re_{ж,d} \sim 1 \cdot 10^5$); $Pr_{ж}$, Pr_c – соответственно значения критерия Прандтля для горячей воды и внутренней стенки трубы; $\bar{\epsilon}_e$ – коэффициент, учитывающий изменение среднего коэффициента теплоотдачи по трубе. Если отношение $\frac{\ell}{d} \geq 50$, то $\bar{\epsilon}_e = 1$, где ℓ – длина трубы, м, d – внутренний диаметр трубы, м.

Учитывая (4), и переходя от частных производных к обыкновенным, получим:

$$\frac{d^2 t}{dx^2} - w_x \frac{c_p}{\lambda} \frac{dt}{dx} - \frac{k_{тр} \pi d_x \ell (t - t_k)}{\lambda} = 0 \quad (9)$$

Представим (9) в более удобный для интегрирования форме:

$$\frac{d^2 t}{dx^2} - w_x \frac{c_p}{\lambda} \cdot \frac{dt}{dx} - \frac{k_{тр} \pi d_x \ell t}{\lambda} = - \frac{k_{тр} \pi d_x \ell t_k}{\lambda} \quad (10)$$

Полагая, что $t_k = \text{const}$ (установившаяся температура в тепловой нагрузке), получим дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами и правой частью в виде константы (полинома нулевой степени). В этом случае будем рассматривать температуру t как функцию одной переменной x т.е. $t = t(x)$.

Решим предварительно однородное дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2 t}{dx^2} - w_x \frac{c_p}{\lambda} \cdot \frac{dt}{dx} - \frac{k_{тр} \pi d_x \ell t}{\lambda} = 0 \quad (11)$$

Для этого составим соответствующее характеристическое уравнение:

$$a^2 - w_x \frac{c_p}{\lambda} \cdot a - \frac{k_{тр} \pi d_x \ell}{\lambda} = 0, \quad (12)$$

корни которого имеют вид:

$$\begin{cases} a_1 = \frac{1}{2} \left(w_x \frac{c\rho}{\lambda} - \sqrt{\left(w_x \frac{c\rho}{\lambda} \right)^2 + \frac{4k_{mp}\pi d_x \ell}{\lambda}} \right) \\ a_2 = \frac{1}{2} \left(w_x \frac{c\rho}{\lambda} + \sqrt{\left(w_x \frac{c\rho}{\lambda} \right)^2 + \frac{4k_{mp}\pi d_x \ell}{\lambda}} \right), \end{cases} \quad (13)$$

где дискриминант D характеристического уравнения (12) определяется по формуле:

$$D = \left(w_x \frac{c\rho}{\lambda} \right)^2 + \frac{4k_{тр}\pi d_x \ell}{\lambda}. \quad (14)$$

Анализируя решение характеристического уравнения (12) отметим, что для постоянного поддержания заданных параметров микроклимата в отапливаемых помещениях необходимо применение автоматического регулирования системы теплоснабжения.

Список используемых источников:

1. Ключева Н.В., Колчунов В.И., Бухтиярова А.С. Ресурсоэнергосберегающая конструктивная система жилых и общественных зданий с заданным уровнем конструктивной безопасности // Промышленное и гражданское строительство. М.: ПГС, 2014. № 2. С. 37-40.
2. Федоров С.С., Ключева Н.В., Тютюнов Д.Н. Управление системой отопления зданий с позиции ресурсосбережения // Строительство и реконструкция. 2013. №5. С. 36-40.
3. Федоров С.С., Тютюнов Д.Н. Алгоритм автоматического управления приводом системы отопления зданий и сооружений // Известия ЮЗГУ. 2011. №5. С. 335-339.
4. Федоров С.С., Ключева Н.В., Тютюнов Д.Н., Студеникина Л.И. К вопросу моделирования процесса управления системой теплоснабжения ресурсоэффективных зданий // Строительство и реконструкция. 2014. №1. С. 86-89.

© 2015, Федоров С.С., Сидоров И.Ю., Труханов И.П.,
Яргункин Д.В., Хазеев Т.Р.
Распределение тепловой энергии в системе
теплоснабжения с позиции энергосбережения

© 2015, Fedorov S.S., Sidorov I.Yu., Trukhanov I.P.,
Yargunkin D.V., Hazeev T.R.
Distribution of thermal energy in system of heat
supply from an energy saving position