УДК 681.51

СТРУКТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАГРЕВА НЕФТЕПРОДУКТА КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Э.Я. Рапопорт, Д.О. Сазонов

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Email: sazonovdo@mail.ru

Приводится математическая модель и структурное представление процесса косвенного подогрева нефтепродукта в печи с газовым энергоносителем при его транспортировке через расположенный в печи технологический трубопровод как объекта управления с распределенными параметрами. Получено структурное представление данного объекта.

***Ключевые слова**: газовая печь, технологический трубопровод, передаточная функция, стандартизирующая функция*

Подогрев нефти при ее первичной подготовке и транспортировке в магистральные трубопроводы производится различными способами. Одним из таких способов является косвенный нагрев потока нефтепродукта во время его перемещения через расположенный в газовой печи технологический трубопровод (рис. 1).

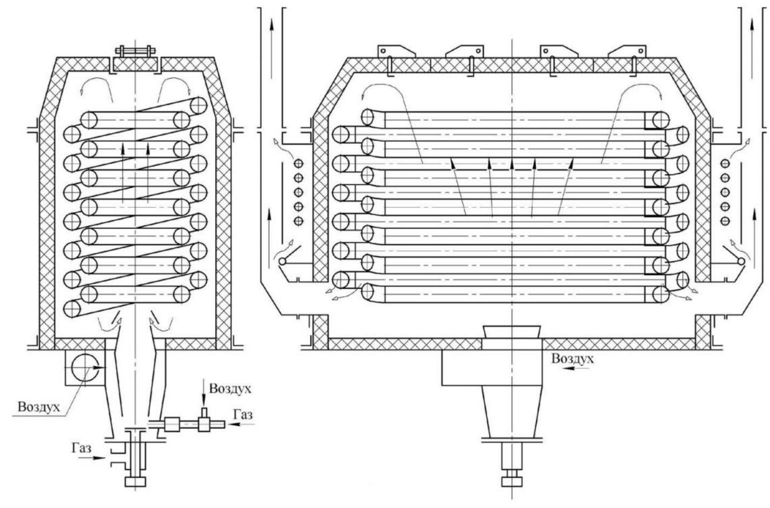

Рис. 1. Конструкция печи косвенного нагрева

Процесс нагрева нефти в этой установке можно в первом приближении описать системой дифференциальных уравнений в частных производных следующего вида:

$$\frac{\partial \theta_c(y,t)}{\partial t} = a\frac{\partial^2 \theta_c(y,t)}{\partial y^2}, \; y \in [0, R], t > 0, \qquad (1)$$

Эдгар Яковлевич Рапопорт (д.т.н., проф.), профессор каф. автоматики и управления в технических системах.

Дмитрий Олегович Сазонов, аспирант.

$$\theta_c(y,0) = \theta_{0c}(y), \tag{2}$$

$$b\frac{\partial \theta_H(x,t)}{\partial t} + bV\frac{\partial \theta_H(x,t)}{\partial x} + \theta_H(x,t) = \theta_c(0,t), \ \ x \in [0,L], \ t > 0, \tag{3}$$

с граничными условиями, учитывающими конвективный характер внешнего теплообмена в печи и теплопередачи между стенкой трубопровода и движущимся потоком нефтепродуктов

$$\lambda \left.\frac{\partial \theta_c(y,t)}{\partial y}\right|_{y=R} = \alpha_g(\theta_g(t) - \theta_c(R,t)) \tag{4}$$

$$\lambda \left.\frac{\partial \theta_c(y,t)}{\partial y}\right|_{y=0} = \alpha_H(\theta_H(L,t) - \theta_c(0,t)) \tag{5}$$

$$\theta_H(0,t) = \theta_{0H}(t) \tag{6}$$

где, $\theta_c(y,t)$ – распределение температуры по толщине стенки трубопровода; $\theta_H(x,t)$ – распределение температуры нефти по длине трубопровода; $\theta_g(t)$ – температура газовой среды в рабочем пространстве печи, которая считается равномерно распределенной по объему теплообменной камеры за счет интенсивной рециркуляции продуктов сгорания; V - скорость перемещения нефтепродуктов по трубопроводу; $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$ – коэффициент температуропроводности; λ – коэффициент теплопроводности; c,γ – удельная теплоемкость и плотность материала стенки трубопровода; b - коэффициент, определяемый геометрическими и теплофизическими характеристиками процесса нагрева нефтепродукта; R, L – толщина стенки и длина трубопровода; α_g, α_H – коэффициенты конвективной теплопередачи.

Модель (1)-(5) процесса косвенного подогрева нефти в газовой печи пренебрегает неравномерностью распределения температуры стенки по длине трубопровода в виду высокой степени равномерности температуры газовой среды на его поверхности; цилиндрической формой поперечного сечения трубопровода в виду малой толщины стенки по сравнению с его диаметром и неравномерностью радиального распределения температуры по сечению движущегося потока нефтепродуктов в виду турбулентного характера их перемещения через трубопровод выполненный в форме продуктового змеевика (рис. 1).

Ввиду малого перепада температур потока нефти по длине трубопровода по сравнению с температурой газовой среды в первом приближении принимается, что в граничном условии (5) фигурирует $\theta_H(L,t)$.

Функции Грина $G_c(y,\xi,t)$ и $G_H(x,\xi,t)$ [1] для уравнений (1), (4)-(5) и (3), (6) моделирующих, соответственно, температурные поля стенки технологического трубопровода и движущегося потока нефтепродуктов, описываются следующими выражениями [1]:

$$G_c(y,\xi,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\varphi^*(\lambda_k,y)\varphi^*(\lambda_k,\xi)}{\left\|\varphi^*(\lambda_k,y)\right\|^2} \exp(-a^2\lambda_k t); \tag{7}$$

$$G_H(x,\xi,t) = 1(x-\xi)\frac{1}{bV}\exp\left(-\frac{1}{bV}(x-\xi)\right)\delta\left(t-\frac{x-\xi}{V}\right). \quad (8)$$

Здесь собственные функции $\varphi^*(\lambda_k, y)$ [1] в (7) представляются в виде:

$$\varphi^*(\lambda_k, y) = \cos(\lambda_k y) + \alpha_H \frac{\sin(\lambda_k y)}{\lambda_k}; \quad (9)$$

Квадрат нормы $\varphi^*(\lambda_k, y)$ вычисляется по формуле:

$$\left\|\varphi^*(\lambda_k, y)\right\|^2 = \frac{\alpha_g}{2\lambda_k^2}\cdot\frac{\lambda_k^2+\lambda_H^2}{\lambda_k^2+\lambda_g^2} + \frac{\alpha_H}{2\lambda_k^2} + \frac{R}{2}\left(1+\frac{\alpha_H^2}{\lambda_k^2}\right); \quad (10)$$

где собственные числа λ_k^2 – положительные корни уравнения:

$$\frac{tg(\lambda R)}{\lambda} = \frac{\alpha_H + \alpha_g}{\lambda^2 - \alpha_H \cdot \alpha_g}; \quad (11)$$

и $\delta(t-\frac{x-\xi}{V})$ в (8) – дельта-функция временного аргумента, сосредоточенная в точке $\tau = \frac{x-\xi}{V}$.

Передаточные функции $W_c(y,\xi,p)$ и $W_H(x,\xi,p)$ соответствующих распределенных блоков рассматриваемого объекта управления по стандартизирующему входному воздействию, зависящему в общем случае от входной пространственной переменной ξ, являются изображениями по Лапласу их функций Грина [2]:

$$W_c(y,\xi,p) = \widetilde{G}_c(y,\xi,p) = \sum_{k=1}^{\infty}\frac{\varphi^*(\lambda_k,y)\varphi^*(\lambda_k,\xi)}{\left\|\varphi^*(\lambda_k,y)\right\|^2}\cdot\frac{1}{p+a^2\lambda_k^2}; \quad (12)$$

$$W_H(x,\xi,p) = \widetilde{G}_H(x,\xi,p) = 1(x-\xi)\frac{1}{bV}\exp\left(-\frac{1+bp}{bV}(x-\xi)\right). \quad (13)$$

Распределенный блок с передаточной функцией $W_c(y,\xi,p)$ представляет собой, согласно (12), параллельное соединение бесконечного числа апериодических звеньев с коэффициентом передачи $\eta_k(y,\xi)$ и постоянными времени T_k:

$$W_c(y,\xi,p) = \sum_{k=1}^{\infty}\eta_k(y,\xi)\cdot\frac{1}{T_k p+1}; \quad (14)$$

где

$$\eta_k(y,\xi) = \frac{1}{a^2\lambda_k^2}\frac{\varphi^*(\lambda_k,y)\varphi^*(\lambda_k,\xi)}{\left\|\varphi^*(\lambda_k,y)\right\|^2}; \quad T_k = \frac{1}{a^2\lambda_k^2} \quad (15)$$

Объект описываемый уравнением (14) представляется в структурном отношении бесконечным числом параллельно соединенных апериодических звеньев первого порядка.

По каналам сосредоточенных входных воздействий $\tilde{\theta}_g(p)$, $\tilde{\theta}_H(L,p)$ и $\tilde{\theta}_c(0,p)$ передаточные функции W_c и W_H преобразуются в передаточные функции соответствующих переходных x-блоков с распределенным выходом [2]. Для их определения запишем стандартизирующие функции для блоков W_c и W_H [1]:

$$\omega_c(\xi,\tau) = \frac{1}{c\gamma}\alpha_g\theta_g(\tau)\delta(\xi - R) - \frac{1}{c\gamma}\alpha_H\theta_H(\mathrm{L},\tau)\delta(\xi); \qquad (16)$$

$$\omega_H(\xi,\tau) = \theta_c(0,\tau). \qquad (17)$$

Зная стандартизирующую функцию (16) и передаточную функцию по стандартизирующему входу (12), найдем передаточные функции x-блоков для температурного поля стенки $\tilde{\theta}(y,p)$ по каждому из указанных сосредоточенных воздействий [2]:

$$S_1(y,p) = \frac{\tilde{\theta}_1(y,p)}{\tilde{\theta}_g(p)} == \int_0^R \tilde{G}_c(y,\xi,p)\cdot\frac{\alpha_g}{c\gamma}\delta(\xi - R)d\xi = \frac{\alpha_g}{c\gamma}\tilde{G}_c(y,R,p); \qquad (18)$$

$$S_2(y,p) = \frac{\tilde{\theta}_2(y,p)}{\tilde{\theta}_H(L,p)} = \int_0^R \tilde{G}_c(y,\xi,p)\cdot\frac{\alpha_H}{c\gamma}\delta(\xi)d\xi = -\frac{\alpha_H}{c\gamma}\tilde{G}_c(y,0,p). \qquad (19)$$

Аналогичным способом получаем передаточную функцию x-блока для потока нефти:

$$S_3(x,p) = \frac{\tilde{\theta}_H(x,p)}{\tilde{\theta}_c(0,p)} = \int_0^x \tilde{G}_c(x,\xi,p)d\xi =$$
$$= \int_0^x \frac{1}{bV}e^{-\frac{bp+1}{bV}(x-\xi)}d\xi = \frac{1}{bp+1}\left(1 - e^{-\frac{x}{bV}}\cdot e^{-\frac{x}{V}p}\right); \qquad (20)$$

В результате получаем с учетом выражений для стандартизирующих функций структурную схему объекта управления (1)-(6) с x-блоками (18), (19) и (20) представленную на рис. 2:

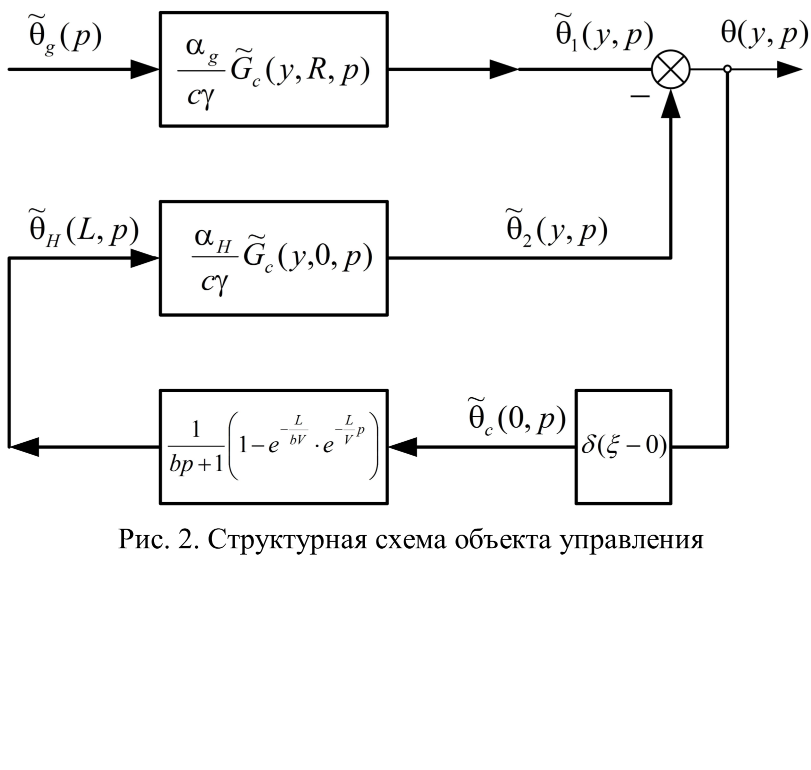

Рис. 2. Структурная схема объекта управления

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бутковский А.Г.* Структурная теория распределенных систем. – М.: Наука, 1977.
2. *Рапопорт Э.Я.* Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами: – М.: Высш. шк., 2003.

Статья поступила в редакцию 2 марта 2012 г.

STRUCTURAL MODELING PROCESS HEATING OIL AS AN OBJECT MANAGEMENT WITH DISTRIBUTED PARAMETERS

E.Ya. Rapoport, D.O. Sazonov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

A mathematical model and a structural representation of the process of indirect heating oil in the oven with a gas energy source during its transportation through the furnace is located in the process pipeline as a control object with distributed parameters. Retrieved structural representation of the object.

Keywords: *gas stove, pipe technology, the transfer function, standardizing function.*

Edgar Ya. Rapoport (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Dmitry O. Sazonov, Postgraduate student.