

## ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ И ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИИ

УДК 625.067/059:798.864.8

Р.Т. Емельянов, Ю.Л. Липовка,  
А.В. Цыганкова, И.И. Терехова, Н.Ю. Клиндух

### ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТРУБОПРОВОДНОЙ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ

Разработана математическая модель трубопроводной системы отопления. Приведены результаты исследования теплового баланса трубы системы отопления с постоянной по длине температурой греющего агента.

**Ключевые слова:** трубопроводные системы отопления, тепловая энергия, тепловой поток, дифференциальные уравнения, температура, передаточная функция, скорость потока.

R.T. Emelyanov, Yu.L. Lipovka,  
A.V. Tsigankova, I.I. Terekhova, N.Yu. Klindukh

### THE THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE PIPELINE HEATING SYSTEM

The mathematical model of the pipeline heating system is developed. The research results of the heat balance of the heating system pipe with a constant temperature along the length of the heating agent are presented.

**Key words:** pipeline heating systems, heat energy, heat flow, differential equations, temperature, transmission function, flow rate.

---

**Введение.** Трубопроводные системы отопления связаны с проблемой коррекции динамических свойств, сокращения потерь тепловой энергии, а также совершенствования режимов передачи энергии теплоносителя. На тепловой баланс трубы системы отопления с постоянной по длине температурой греющего агента в большинстве случаев влияет изменение скорости потока [1–3]. Для успешного решения проблемы сбережения энергетических ресурсов необходимо совершенствование методов расчета, позволяющих выбирать наиболее рациональные проектные решения.

**Цель работы.** Исследование теплового баланса трубы системы отопления с постоянной по длине температурой греющего агента.

**Объекты и методы исследования.** Объектом исследований выбрана трубопроводная система отопления. На рисунке 1 приведена расчетная схема теплового баланса трубы системы отопления с постоянной по длине температурой греющего агента.

Допущения:

1. Свойства обрабатываемого теплового потока неизменны во времени и по длине аппарата.
2. Температура стенки берется как среднеинтегральная по толщине.
3. Тепловой поток в аксиальном направлении пренебрежимо мал.
4. Коэффициенты теплоотдачи постоянны по длине аппарата.

Для исследования выделим на расстоянии  $x$  от входа обрабатываемого потока элемент  $dx$  (рис. 1).

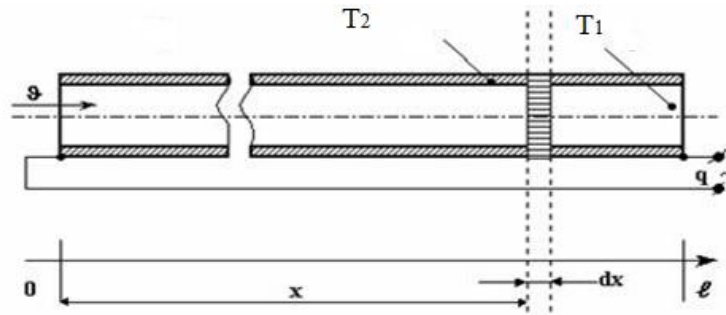


Рис. 1. Расчетная схема теплообменника

Принятые обозначения:  $x$  – текущая координата теплообменника, м;  $l$  – длина теплообменника, м;  $t$  – текущее время, с;  $D, d$  – диаметр трубы, м;  $c$  – теплоемкость;  $\gamma$  – плотность теплоносителя;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\vartheta$  – скорость движения;  $\vartheta_0$  – постоянная начальная скорость;  $\delta \vartheta$  – возмущение скорости;  $T_1$  – температура теплоносителя;  $T_2$  – температура поверхности трубы;  $q$  – удельный тепловой поток;  $k$  – коэффициент;  $f, \psi$  – возмущающие функции  $\theta, f, \delta \vartheta$  – преобразование Лапласа по переменной  $t$  соответственно для  $\theta, f, \delta \vartheta$ ;  $\delta \theta$  – отклонение температуры от номинального значения вследствие изменения скорости  $\delta \vartheta$ .

Дифференциальный тепловой баланс для элементарного кольца стенки за время  $dt$

$$c_2 \gamma_2 \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} dx \cdot dT_2 = \alpha_{12}(T_1 - T_2) \cdot \pi d \cdot dx \cdot dt + \alpha_{32} \pi D \cdot dx \cdot (T_3 - T_2) \cdot dt. \quad (1)$$

Так как поток движется, то полная производная  $\frac{dT_1}{dt}$  будет равна

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{\partial T_1}{\partial t} + \vartheta \frac{\partial T_1}{\partial x}. \quad (2)$$

Преобразовав (1), (2), получим систему двух дифференциальных уравнений в частных производных с краевыми и начальными условиями

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial t} + \vartheta \frac{\partial T_1}{\partial x} = \frac{1}{T_{12}}(T_2 - T_1); \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{1}{T_{21}}(T_1 - T_2) + k \cdot q; \\ T_1(x, 0) = T_2(x, 0) = 0; T_1(0, t) = f_1(t); T_{21} \cdot k \cdot q(t) = \Psi_3(t). \end{cases} \quad (3)$$

Здесь  $f_1(t), f_3(t)$  и  $\Psi_3(t)$  – произвольные функции времени.

На температуру  $T_1$  трубы системы отопления с постоянной по длине температурой греющего агента влияет изменение скорости потока. При скорости потока  $\vartheta_0$  начальная температура составляет соответственно  $T_{10}$  и  $T_{20}$ . При изменении скорости  $\vartheta_0 + \delta \vartheta(t)$  можно записать уравнение (3) в виде

$$\begin{cases} (\vartheta_0 + \delta \vartheta) \frac{\partial(T_{10} + \Delta T_1)}{\partial x} + \frac{\partial(T_{10} + \Delta T_1)}{\partial t} = \frac{1}{T_{12}}(T_{20} + \Delta T_2 - T_{10} - \Delta T_1); \\ \frac{\partial(T_{20} + \Delta T_2)}{\partial t} = \frac{1}{T_{23}}(T_3 - T_{20} - \Delta T_2) + \frac{1}{T_{21}}(T_{10} + \Delta T_1 - T_{20} - \Delta T_2). \end{cases} \quad (4)$$

Пренебрегая членами второго порядка малости, систему запишем в виде двух систем дифференциальных уравнений:

1) исходная (невозмущенная)

$$\begin{aligned} \vartheta_0 \frac{\partial T_{10}}{\partial x} + \frac{\partial T_{10}}{\partial t} &= \frac{1}{T_{12}} (T_{20} - T_{10}); \\ \frac{\partial T_{20}}{\partial t} &= \frac{1}{T_{23}} (T_3 - T_{20}) + \frac{1}{T_{21}} (T_{10} - T_{20}); \\ T_{10}(x, 0) &= T_{20}(x, 0) = 0; T_{10}(0, t) = f_1(t); T_3 = f_3(t). \end{aligned} \quad (5)$$

2) система в отклонениях

$$\begin{aligned} \vartheta_0 \frac{\partial \Delta T_1}{\partial x} + \frac{\partial \Delta T_1}{\partial t} &= \frac{1}{T_{12}} (\Delta T_2 - \Delta T_1) - \delta \vartheta \cdot \frac{\partial T_{10}}{\partial x}; \\ \frac{\partial \Delta T_2}{\partial t} &= -\frac{\partial \Delta T_2}{T_{23}} + \frac{1}{T_{21}} (\Delta T_1 - \Delta T_2); \\ \Delta T_1(x, 0) &= \Delta T_2(x, 0) = 0; \Delta T_1(0, t) = \Delta T_2(0, t) = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Приращение температуры  $\Delta T_1$  запишется в виде уравнения

$$\frac{\partial \bar{T}_{10}(p, x)}{\partial x} \Big|_{p \rightarrow 0} = \frac{-\exp\left(-\frac{x}{\vartheta_0} \cdot \frac{1}{T}\right)}{\vartheta_0 \cdot T} (f_{10} - f_{30}). \quad (7)$$

Операторное уравнение температуры  $\Delta T_1$  запишется

$$\Delta \bar{T}_1(p, x) = \frac{\delta \vartheta(p)}{\vartheta_0} (f_{10} - f_{30}) \frac{1}{p} \cdot \frac{N(p)}{Q(p)} \left[ \exp\left(-\frac{x}{\vartheta_0} \cdot \frac{1}{T}\right) - \exp\left(-\frac{x}{\vartheta_0} \cdot \frac{M(p)}{N(p)}\right) \right]. \quad (8)$$

На рисунке 2 представлена схема моделирования передаточной функции по изменению скорости потока. Особенностью этой схемы является необходимость тщательной установки коэффициента  $\exp\left(-\frac{x}{\vartheta_0} \cdot \frac{1}{T}\right)$  так, чтобы он в точности был равен коэффициенту усиления звена  $\exp\left(-\frac{x}{\vartheta_0} \cdot \frac{M(p)}{N(p)}\right)$  в статике.

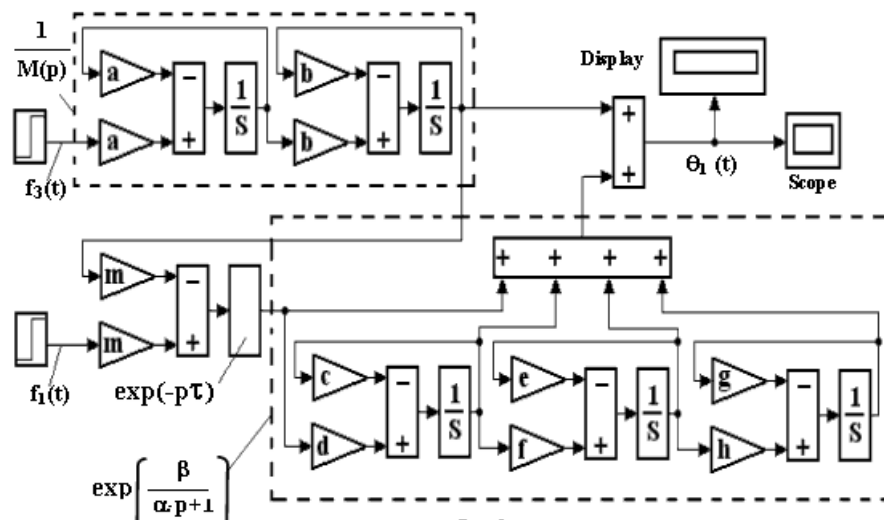


Рис. 2. Схема моделирования передаточной функции по изменению скорости потока

С учетом изменения коэффициента теплоотдачи при изменении скорости операторное уравнение температуры  $\Delta T_1$  будет идентичным

$$\Delta T_1(p, x) = \frac{\delta \vartheta(p)}{\vartheta_0} (f_{10} - f_{30}) \frac{0,2 \cdot N_1(p)}{p \cdot Q(p)} \left[ \exp\left(-\frac{x}{\vartheta_0} \cdot \frac{1}{T}\right) - \exp\left(-\frac{x}{\vartheta_0} \cdot \frac{M(p)}{N(p)}\right) \right]. \quad (9)$$

При выводе математических моделей были приняты следующие обозначения:

Постоянные времени

$$T_{12} = \frac{c_1 \gamma_1 d}{4 \alpha_{21}}; T_{21} = \frac{c_2 \gamma_{12} (D^2 - d^2)}{4 \alpha_{21} \alpha}; T_{23} = \frac{c_2 \gamma_2 (D^2 - d^2)}{4 \alpha_{32} d}; T = T_{12} \left( \frac{T_{23}}{T_{21}} + 1 \right).$$

Многочлены от  $p$

$$M(p) = T_{12} T_{23} p^2 + (T + T_{23}) p + 1; N(p) = T_{12} T_{23} p + T; \\ N_1(p) = N(p) + 4 \frac{T_{12} T_{23}}{T_{21}}; Q(p) = T_{12} \cdot T_{23} \cdot T \left( p + \frac{1}{T_{12}} + \frac{1}{T_{21}} + \frac{1}{T_{23}} - \frac{1}{T} \right).$$

Результаты моделирования приведены на рисунках 3 и 4. На рисунке 3 приведены зависимости изменения температуры при скачкообразном возмущении скорости потока.

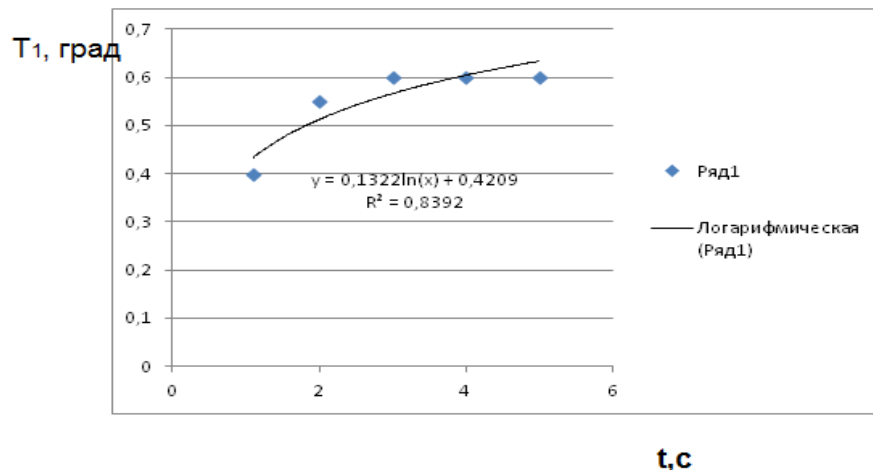


Рис. 3. Изменение температуры при скачкообразном возмущении скорости потока

На рисунке 4 приведены результаты моделирования при ступенчатом изменении скорости потока.

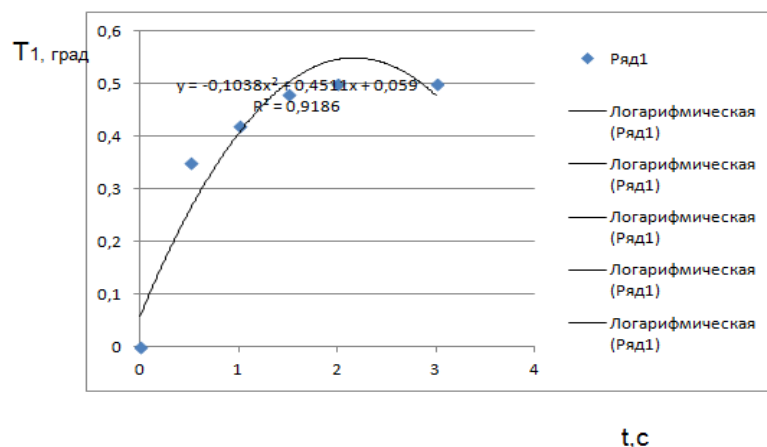


Рис. 4. Изменение температуры при ступенчатом изменении скорости потока

Статистическая ошибка составила  
 $\exp(0,5) - (1 + 0,5 + 0,125 + 0,02) = 0,003$ , что допустимо.

### Заключение

1. Математическая модель трубопроводной системы отопления позволяет моделировать переходные процессы, связанные с изменением режима истечения теплоносителя.

2. Результаты моделирования динамических процессов трубопроводной системы отопления позволили установить влияние скорости потока на недогрев теплоносителя и компенсацию за счет увеличения коэффициента теплоотдачи.

### Литература

1. Автушенко Н.А., Леневский Г.С. Анализ частотных свойств динамической составляющей поведения теплоносителя в магистральном трубопроводе // Изв. вузов и энергетических объединений СНГ. – 2008. – № 6. – 31 с.
2. Математическое моделирование потокораспределения на тепловых пунктах / Ю.Л. Липовка, В.И. Панфилов, А.Ю. Липовка [и др.] // Энергосбережение и водоподготовка. – 2008. – № 3. – С. 65–67.
3. Селезнев В.Е., Алешин В.В., Прялов С.Н. Основы численного моделирования магистральных трубопроводов / под ред. В.Е. Селезнева. – М.: Ком-Книга, 2005. – 496 с.



УДК 621.37: 636.5

Д.О. Суринский, А.А. Ашихмин

### ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ БОРЬБЫ С СИНАНТРОПНЫМИ ПТИЦАМИ НА ОБЪЕКТАХ АПК

*В статье рассмотрена проблема потерь урожая и снижения качества продукции от воздействия синантропных птиц. Проанализированы существующие методы борьбы с птицей. Выделены преимущества использования электрофизического метода борьбы с синантропными птицами на объектах АПК.*

**Ключевые слова:** синантропные птицы, методы борьбы, электрофизический метод.

D.O. Surinsky, A.A. Ashikhmin

### ELECTROPHYSICAL METHODS OF FIGHT AGAINST SYNANTHROPIC BIRDS ON THE AIC OBJECTS

*The issue of the yield losses and production quality decrease because of the synanthropic bird influence is considered in the article. The existing methods of fight against birds are analyzed. The advantages of the electro-physical method use for fight against synanthropic birds on the AIC (agro-industrial complex) objects are singled out.*

**Key words:** synanthropic birds, fight methods, electrophysical methods.

---

**Введение.** В настоящее время территории городов и их окраины служат местом обитания не только людей и домашних животных, но и являются местом обитания многочисленных видов диких птиц. В населенных пунктах и в их близи сформировалась специфическая фауна птиц. Основными её особенностями являются ограниченное количество видов и большое количество особей. Это связано с тем, что немногие виды птиц смогли приспособиться к специфическим условиям жизни в городе. Однако те, которые смогли приспособиться, нашли на территории города благоприятную среду для быстрого и массового размножения. Численность птиц-синантропов в крупных городах достигает десятков и сотен тысяч особей [1].

Синантропными птицами называют диких птиц, которые постоянно обитают в соседстве с человеком или нашли благоприятные условия гнездования на территории населенных пунктов и их окрестностей. Многие сферы жизни синантропных птиц напрямую связаны с деятельностью человека; так, питание синантро-