

ров, изучая, тем самым процессы, протекающие в утилизационных установках рекуперативного типа и теплообмен в целом.

Разработанная и приведённая в работе лабораторная установка позволяет решать задачи теплообмена широкого спектра с различными граничными условиями при разнообразных режимах эксплуатации, максимально приближенных к реальному процессу. В связи с этим установка является универсальной для изучения, исследования и моделирования процесса теплообмена. Она позволяет получить наглядное представление о теплопередаче, тепловых потоках, закономерностях, имеющих место при теплообмене, и является практическим учебным пособием при подготовке кадров высшей квалификации.

Список использованных источников

1. Мигай В.К. Повышение эффективности современных теплообменников. – Л.: Энергия, 1980. – 144 с.
2. Справочник по теплообменникам. В 2 томах. Т.1, пер. с англ. / Под ред. О.Г. Мартыненко и др. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 352 с.
3. Попов И.А., Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В. Промышленное применение интенсификации теплообмена – современное состояние проблемы (обзор) / Теплоэнергетика, 2012, №1. – С. 3–14.
4. Антуфьев В.М. Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева. – М.: Энергия, 1966. – 184 с.
5. Керн Д., Краус А. Развитые поверхности теплообмена. – М.: Энергия, 1977. – 464 с.
6. Калинин Э.К. Эффективные поверхности теплообмена. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 408 с.
7. Герасименко Т.Е., Мешков Е.И., Дикарева А.В. Состояние, проблемы и стимулирование утилизации тепла газов промышленных печей // Цветная металлургия, 2011, №1. – С. 30-35.
8. Авторское свидетельство СССР №1695123. Установка для исследования работы теплообменного аппарата / В.М. Спицин, В.И. Караваев. опубл. 30.11.1991.
9. Патент РФ на полезную модель №65277. Лабораторная установка по теплопередаче / Т.А. Енютина, С.Г. Марченкова, опубл. 27.07.2007.
10. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей: Под науч. ред. В.А. Арутюнова. – М.: Металлургия, 1990. – 240 с.
11. Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А. и др. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. Кн. 1, 2: Под науч. ред. Айнштейна В.Г. – М.: Химия, 2000. – 1760 с.

УДК 621.18

В. А. Муңц¹, А. И. Папченков², Е. Ю. Павлюк¹, А. С. Осминкина¹

¹ ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

² ООО «УГМК-Холдинг», г. Екатеринбург, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕРМОСИФОНАХ

Аннотация

Работа направлена на изучение переходных процессов в термосифонах. Получены расчетные зависимости для определения основных температурных характеристик объекта регулирования. Для этого были определены термические сопротивления основных элементов термосифона. Предложены уравнения для расчета изменения температуры насыщения в термосифоне в зависимости от конструктивных и режимных параметров теплоутилиза-

тора. Термосифон в данном случае рассматривается как объект регулирования, а изменение расхода газа (или отключение теплоутилизатора) – как входное возмущение. Получены выражения для постоянной времени и коэффициента усиления при ступенчатом увеличении температуры газов. Приведены расчеты изменения температуры насыщения в термосифоне при линейном уменьшении температуры газов. Приведены данные экспериментальных исследований при останове теплоутилизатора, в которых измерялись изменения температуры газов и температуры насыщения в термосифонах. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показывает удовлетворительное совпадение.

Ключевые слова: термосифон, температура, термическое сопротивление, конвективный газоход, постоянная времени.

Abstract

The work is aimed at studying of transient processes in thermosyphons. The calculated dependences for determining the basic temperature characteristics of the controlled object are obtained. For this, the thermal resistances of main elements in thermosyphon has been wrote and calculated. Equations for calculating the change in saturation temperature in a thermosyphon are proposed. These changing are strongly depends on the design and operating parameters of the heat exchanger.

In this case thermosyphon is considered as an object of regulation. Gases flow rate changing (or heat exchanger switch off case) is considered as inlet distribution. Expressions for the time constant and the gain factor with a stepwise increase in the temperature of the gases are obtained.

Calculations of the change in the saturation temperature in a thermosyphon with a linear decrease in the temperature of gases are shown. The data of experimental studies are given when the heat exchanger is stopped. For these investigations the changes in the temperature of gases and the saturation temperature in thermosyphons were held. Comparison of the calculated and experimental data show a satisfactory agreement.

Keywords: thermosyphon, temperature, thermal resistance, flue gases pipe, time constant.

Замкнутые двухфазные термосифоны зарекомендовали себя во многих областях промышленности как высокоэффективные, надежные теплопередающие устройства благодаря сочетанию ряда уникальных свойств: простоты изготовления, отсутствия движущихся частей и потребности в перекачивании теплоносителя, возможности создания изотермических условий на больших площадях и значительной теплопередающей способности.

Работа выполнена на медеплавильном комбинате «Святогор», г. Красноуральска, на установке для утилизации теплоты за отражательной печью № 2. В отражательную печь загружается шихта, внутри печи поддерживается температура порядка 1500 °С за счет работы газовых горелок. Для снижения потерь теплоты уходящих газов руководством предприятия было принято решение об установке котла-утилизатора за печью. Проект котла-утилизатора был разработан ОАО «Уралэнергоцветмет», г. Екатеринбург. В поворотной камере установлен блок термосифонов, который выполняет в большей степени роль заградительного устройства от пыли и шлака, поступающих с газами.

Термосифон представляет собой наглухо заваренную с обеих сторон трубку, на треть заполненную водой. Часть трубки находится в «горячей» области, где ее омывают газы, вследствие чего вода в термосифоне нагревается, закипает, и идет в верхнюю «холодную» часть, конденсатор, представляющий собой теплообменник «труба в трубе», роль охладителя в котором играет вода из барабана сепаратора. Термосифон нагревает ее до температуры насыщения, пар, идет на производство.

В данной работе сделана попытка рассмотреть работу термосифона как объекта системы автоматического регулирования с определением его основных параметров экспериментальным и расчетным путем. Для этого необходимо получить уравнение объекта. В данном случае это уравнение изменения температуры насыщения в термосифоне во времени в зависимости от режимных и конструктивных параметров термосифона.

Рассмотрим работу отдельного термосифона, осуществляющего передачу теплоты между двумя средами: газом с температурой t_r и кипящей водой в барабане котла t_6 (рис. 1).

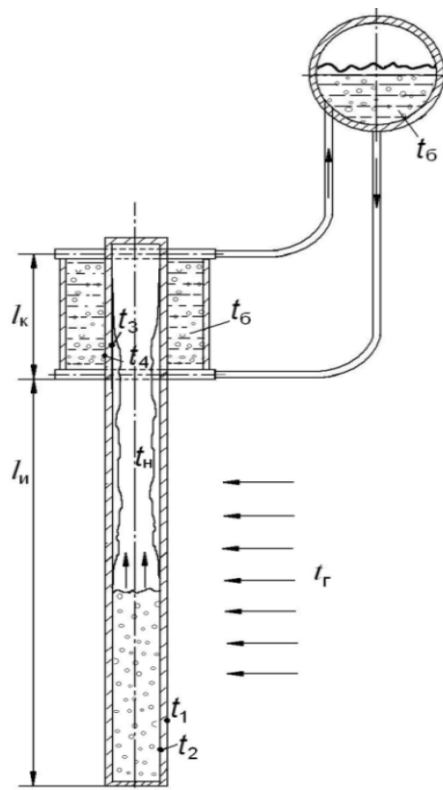


Рис. 1. Схема термосифона: l_n – длина зоны испарения;
 l_k – длина зоны конденсации диаметр термосифонов 90×6 мм; $l_n=3,34$ м; $l_k=1,5$ м

Теплота от газов с температурой t_r последовательно передается сначала к внешней поверхности испарителя тепловой трубы с t_1 , затем теплопроводностью по стенке к внутренней поверхности, имеющей температуру t_2 . На внутренней поверхности происходит кипение жидкости термосифона, при котором за счет скрытой теплоты парообразования осуществляется передача теплоты кипящей воде с температурой насыщения t_n . В зоне охлаждения теплота от пара за счет конденсации передается внутренней поверхности трубы участка охлаждения, температура которой t_3 . Затем происходит перенос теплоты к внешней поверхности с t_4 и к нагреваемой среде (кипящей в барабане воде) с температурой t_6 .

Для решения поставленной задачи определим суммарное термическое сопротивление каждого элемента в рассмотренной схеме передачи теплоты между двумя средами последовательно: теплоотдачи от газов к стенке; теплопроводности в зоне испарения; теплоотдачи от газов к стенке; теплопроводности в зоне испарения; при испарении теплоносителя в термосифоне; при конденсации теплоносителя в термосифоне; теплопроводности в зоне конденсации; при теплоотдаче от наружной стенки термосифона к охлаждающему теплоносителю.

Передаваемый трубой тепловой поток определяется по формуле:

$$Q = (t_r - t_6) / R, \quad (1)$$

где R – суммарное термическое сопротивление.

При определении термических сопротивлений можно считать, что в термосифонах сравнительно большого диаметра кипение имеет пузырьковый характер [1]. Для расчета коэффициента теплоотдачи при конденсации пара на внутренней поверхности термосифона используется формуле Нуссельта [2].

Предварительные расчеты показали, что при протекании переходных процессов, затраты теплоты на изменение температуры стенки трубы термосифона в зоне конденсации пренебрежимо малы ($\approx 5\%$) по сравнению с количеством теплоты, воспринимаемой стенкой трубы термосифона и кипящей водой в зоне испарения.

Принимая, что температуры насыщения и стенки термосифона в зоне испарения близки, уравнение для изменения температуры насыщения в термосифоне при изменении температуры газов в котле-утилизаторе имеет вид

$$(M_m \cdot c_m + M_s \cdot c_s) \frac{dt_n}{d\tau} = \frac{(t_2 - t_n)}{R_u} - \frac{(t_n - t_0)}{R_k}. \quad (2)$$

Здесь: R_u и R_k – суммы термических сопротивлений в зоне испарения и конденсации.

Суммарное термическое сопротивление в зоне испарения и конденсации можно представить как произведение соответствующей поверхности и коэффициента теплопередачи $R_u = k_u \cdot F_u$, $R_k = k_k \cdot F_k$. Тогда уравнение (2) можно представить в виде

$$(M_m \cdot c_m + M_s \cdot c_s) \frac{dt_n}{d\tau} = k_u \cdot F_u \cdot (t_2 - t_n) - k_k \cdot F_k \cdot (t_n - t_0). \quad (3)$$

В начальный момент времени равный $\tau = 0$, в стационарном состоянии, температура насыщения находится из условия $dt/d\tau = 0$. Откуда определяется начальная температура насыщения

$$t_{n,0} = \frac{k_u \cdot F_u \cdot t_{2,0} + k_k \cdot F_k \cdot t_0}{k_u \cdot F_u + k_k \cdot F_k}. \quad (4)$$

Пусть далее температура газов скачком изменяется до значения t_r , при этом с течением какого-то времени изменится и температура насыщения t_k в термосифоне до конечного значения равного

$$t_k = \frac{k_u \cdot F_u \cdot t_r + k_k \cdot F_k \cdot t_0}{k_u \cdot F_u + k_k \cdot F_k}. \quad (5)$$

Введем безразмерную температуру $\vartheta = t_n/t_0$ и безразмерное время, равное $\sigma = \tau \cdot \frac{k_u \cdot F_u + k_k \cdot F_k}{M_m \cdot c_m + M_s \cdot c_s}$. После преобразований получим уравнение вида

$$d\vartheta/d\sigma = \vartheta_k - \vartheta, \quad (6)$$

где $\vartheta_k = t_k/t_0$.

Интегрируя (6) как $\int_{\vartheta_n}^{\vartheta} \frac{d\vartheta}{\vartheta_k - \vartheta} = \int_0^{\sigma} d\sigma$ получим решение в следующем виде [3]

$$\vartheta = \vartheta_k - (\vartheta_k - \vartheta_{n,0}) \cdot \exp(-\sigma). \quad (7)$$

Расчеты изменения температуры насыщения в термосифоне были проведены для блока термосифонов, установленных в конвективном газоходе за металлургической печью на предприятии «Святогор» при следующих условиях: начальная температура газа $t_{r,0} = 900$ °С, конечная температура газа $t_{r,k} = 1000$ °С. Результаты расчетов показали, что продолжительность переходного процесса составляет около 10 минут.

На самом деле организовать ступенчатое изменение температуры на промышленной печи практически невозможно, из-за инерции самой печи и необходимости соблюдения регламента пуска и останова. На рис. 2 приведено изменение расхода газа при останове печи и соответствующее изменение температур насыщения в термосифонах. Для получения зависимостей изменения температуры газа со временем, была получена аппроксимация на линейном участке изменения температуры газов (рис. 2).

При линейном изменении температуры газов со временем $t_2 = t_{2,0} - a\tau$ получим уравнение

$$(M_m \cdot c_m + M_s \cdot c_s) (dt_n/d\tau) = k_u \cdot F_u (t_{2,0} - a\tau - t_n) - k_k \cdot F_k (t_n - t_0). \quad (8)$$

При $\tau = 0$, начальная температура определится из начальных условий, конструктивных и режимных параметров. Как и ранее уравнение изменения температуры насыщения в термосифоне приведем к безразмерному виду и получим уравнения для изменения безразмерной температуры насыщения в следующем виде

$$d\vartheta/d\sigma = \vartheta_0 - \vartheta - \varphi \cdot \sigma. \quad (9)$$

$$\text{Здесь } \varphi = \frac{k_{\text{и}} \cdot F_{\text{и}} \cdot a}{t_{\sigma}} \cdot \frac{M_{\text{м}} \cdot c_{\text{м}} + M_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}}}{(k_{\text{и}} \cdot F_{\text{и}} + k_{\text{к}} \cdot F_{\text{к}})^2}.$$

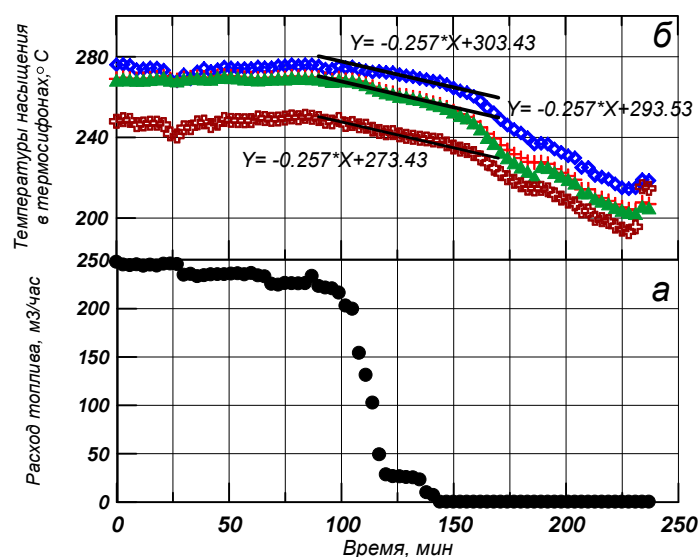


Рис. 2. Изменение расхода топлива (а) и температур насыщения в различных термосифонах (б) при останове печи

Решением данного уравнения является безразмерный комплекс в виде [3] $v(\sigma) = \vartheta_0 + \varphi - \varphi \cdot \sigma + C_1 \cdot \exp(-\sigma)$, где постоянная интегрирования находится из начального условия $\sigma = 0, \vartheta = \vartheta_0$. Тогда

$$v(\sigma) = \vartheta_0 + \varphi [1 - \sigma - \exp(-\sigma)]. \quad (10)$$

Расчеты изменения температуры насыщения в термосифоне проведены во временном интервале от 90 до 160 мин. Возмущение температурой газов начинается с 90-ой минуты, а на 150 минуте температура газов становится ниже температуры кипения воды в барабане. Как видно из рис. 2 тангенс угла наклона линейной аппроксимации переходного процесса для температуры газов составляет 2,57, а для температуры насыщения в термосифоне - 0,257; то есть отличается в 10 раз. Эти данные соответствуют расчетному значению коэффициента усиления равному 0,1, рассчитанному для параметров существующего термосифона.

Выводы

1. Получены расчетные характеристики (постоянные времени и коэффициент усиления) термосифона как объекта регулирования при ступенчатом возмущении изменением температуры газов.

2. На величину постоянной времени основное влияние оказывают массовая теплоемкость металла термосифона и воды в нем, а также произведение коэффициентов теплопередачи и площади поверхности в зоне испарения и конденсации.

Список использованных источников

1. Михеев М.А. Основы теплопередачи. – М: Госэнергоиздат, 1956. – 392 с.
2. Теплопередача: учебник для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел; 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М., 1968. – 720 с.