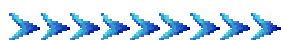




ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХ- НИКИ



ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ

Министерство образования и науки Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
"Тамбовский государственный технический университет"

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХ- НИКИ

Методические указания к лабораторным работам
для студентов 2 и 3 курса специальности 140106



Тамбов
Издательство ТГТУ
2006

УДК 621.1.016(076)
ББК Z311я73-5
Л99

Утверждено Редакционно-издательским советом университета

Рецензенты:

Кандидат технических наук, доцент
Ю.М. Головин

Кандидат химических наук, доцент
В.И. Барсуков

Кандидат технических наук, доцент
В.А. Набатов

Составитель

Кандидат технических наук, профессор
В.И. Ляшков

Л99 Теоретические основы теплотехники: Метод. указ. / Сост. В.И. Ляшков. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. 24 с.

Приведены методические указания и порядок выполнения лабораторных работ, включая подробное описание экспериментальной установки, методики проведения экспериментов и обработки опытных данных.

Предназначены для студентов специальности 140106.

УДК 621.1.016(076)

ББК Z311я73-5

© Тамбовский государственный
технический университет (ТГТУ), 2006

Учебное издание

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ

Методические указания к лабораторным работам

Составитель
ЛЯШКОВ Василий Игнатьевич

Редактор Т.М. Глинкина

Компьютерное макетирование Е.В. Кораблевой

Подписано к печати 05.05.2006
Гарнитура Times New Roman. Формат 60 × 84/16. Бумага газетная.
Печать офсетная. Объем: 1,39 усл. печ. л.; 1,4 уч.-изд. л.
Тираж 200 экз. С. 246

Издательско-полиграфический центр ТГТУ
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ МЕТОДОМ ПЛОСКОГО БИКАЛОРИМЕТРА

Цель работы. Методом плоского бикалориметра определить величину коэффициента теплопроводности λ . Сравнить результаты измерений с данными из литературных источников.

Основы теории

Коэффициент теплопроводности λ определяет количество теплоты, передаваемой через единицу изотермической поверхности внутри твердого тела за единицу времени при температурном напоре в один градус на расстоянии в 1 м. Это одна из важнейших теплофизических характеристик материала, определяющая способность тел проводить тепло. Знание величины λ совершенно необходимо при инженерных расчетах процессов теплообмена.

Теоретическую основу измерений составляет теория регулярного режима нестационарной теплопроводности, в соответствии с которой при наступлении регулярного режима нагрева или охлаждения температура t в любых точках тела с течением времени меняется по закону экспоненты

$$t = t_0 + Ae^{m\tau},$$

где t_0 – начальная температура тела; A – множитель, зависящий от формы тела и положения точки, в которой исследуется температура; m – темп нагревания или охлаждения, зависящий еще и от теплопроводности, теплоемкости и плотности материала, а также от условий на границе между телом и окружающей средой; τ – текущее время.

Начальный этап любого неустановившегося процесса теплопроводности существенно зависит от начальных условий, например, от первоначальной неравномерности распределения температуры в теле. Однако с течением времени влияние этой неравномерности уменьшается, температурное различие существенно сглаживается, оно становится практически неощутимым. Вот тогда и наступает тот режим, который называют регулярным. Регулярный режим охлаждения или нагревания наступает, таким образом, на последующем этапе процесса. Первоначальный же этап, на котором изменение температуры по времени описывается гораздо более сложными зависимостями и который называют нерегулярным режимом нестационарной теплопроводности, составляет примерно 15...25 % от общей продолжительности процесса.

Для тел простой формы (плоская стенка, цилиндр, шар) значения A и m определены сравнением приведенной формулы с результатами аналитического решения задачи. Это дает возможность получить формулы для расчета коэффициента температуропроводности, $a = \lambda/(pc)$ по величине экспериментально определенного значения m . Если известны значения ρ и c (измерены какими – то другими методами), тогда легко находится и величина λ . Аналогично могут быть рассмотрены и составные тела, что позволяет определять теплофизические свойства образцов, находящихся в тепловом контакте с теплоемким ядром бикалориметра.

Теория регулярного режима и теория различных бикалориметров достаточно подробно и доказательно описаны в учебной литературе [1] – [3]. Этому же вопросу посвящена и специальная монография [4].

Экспериментальная установка и методика измерений

Общий вид экспериментальной установки приведен на рис. 1. Основу установки составляет плоский бикалориметр ПБ-63, предназначенный для измерения термического сопротивления R_T и коэффициента теплопроводности λ твердых материалов с плотностью до 1000 кг/м^3 и сыпучих материалов не зависимо от плотности в интервале температур от 30 до $60 \text{ }^\circ\text{C}$ с погрешностью измерений не более $\pm 10 \%$.

Конструктивно бикалориметр состоит из массивного латунного ядра 7, внутри которого установлены электронагреватель и медь – константановая термопара. Снаружи ядра с обеих его сторон располагаются плоские образцы 6, к которым специальными гайками (на схеме не показаны) прижимаются латунные охлаждающие блоки 5. На поверхности одного из них установлена другая такая же термопара 8. Блоки эти имеют внутренние полости, по которым с помощью термостата 1 и по трубкам 2 прокачивается охлаждающая вода.

Термопарные провода подводятся к блоку холодных спаев 9 и включаются дифференциально. В результате цифровой милливольтметр 10 будет показывать величину термоэдс, пропорциональную разнице температур в точках измерения, т.е. практически разницу температур на поверхностях исследуемого образца.

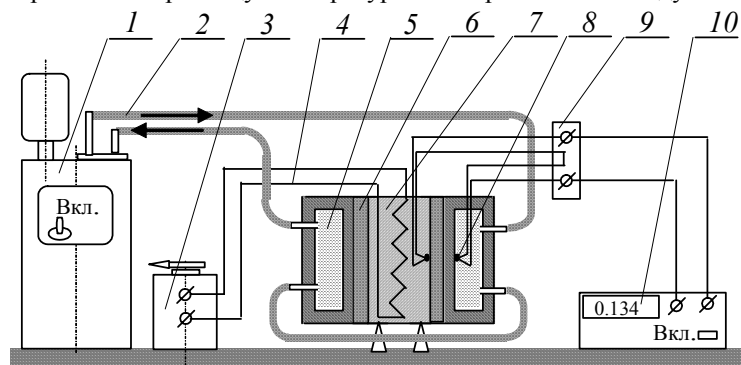


Рис. 1 Схема экспериментальной установки:

1 – ультратермостат водяной; 2 – трубки резиновые; 3 – ЛАТР; 4 – электрические провода; 5 – охлаждающий блок; 6 – образец; 7 – ядро латунное; 8 – термopар; 9 – блок холодных спаев; 10 – цифровой милливольтметр

Заметим при этом, что температура на наружной поверхности образца во время эксперимента будет оставаться практически постоянной и равной температуре охлаждающей воды, а температура внутренней поверхности образца будет равна температуре ядра 7, одинаковой по всему объему ядра из-за его высокой теплопроводности. Таким образом на обеих поверхностях образца мы имеем граничные условия первого рода.

Электронагреватель ядра питается по проводам 4 от сети переменного тока через лабораторный автотрансформатор 3.

Подготовка установки к работе

- 1 Проверить правильность подключения трубок водяного охлаждения, проводов питания электронагревателя и термopар.
- 2 Взвесить образцы на весах ВЛТК – 500 с точностью до 0,1 г.
- 3 Измерить диаметр и толщину образцов с помощью штангенциркуля с точностью до 0,1 мм.
- 4 Установить образцы в прибор. Для этого отвинтить накидные гайки, повернуть стопорные винты и отделить один из блоков 5 от корпуса бикалориметра. Уложить на ядро 7 один из образцов. Резьбовое кольцо охлаждающего блока установить под размер на 0,3 мм меньший, чем толщина образца и установить блок в корпус по соответствующей направляющей поверхности. Повернуть стопорные винты и равномерно прижать прижимными гайками блок 5 к ядру 7. Установить второй образец, повторив все эти же операции с другой стороны бикалориметра.
- 5 Установить ручку регулирования напряжения на ЛАТРе в крайнее положение, повернув ее против часовой стрелки ($U = 0$ В).

Проведение эксперимента

- 1 Включить электропитание и с помощью ЛАТРА подать на электронагреватель напряжение питания порядка 100...120 В.
- 2 По мере прогрева ядра 7 по показаниям милливольтметра 10 следить за изменением температуры ядра. Когда температура ядра на 20...30 К станет выше температуры охлаждающей воды (милливольтметр 10 будет показывать $\Delta E_T = 0,8 \dots 1,2$ мВ), выключить электронагрев ядра.
- 3 Записать термограмму остывания образцов, для чего через каждые 3 мин фиксировать и записывать в таблицу исходных опытных данных значения термоэдс ΔE_T , измеряемые милливольтметром 10. Опыт можно прекратить, когда таких записей будет не менее десяти, а величина ΔE_T уменьшится примерно вдвое.
- 4 Без разборки калориметра повторить нагрев ядра и запись термограммы (пункты 1, 2 и 3), заполняя другие столбцы таблицы исходных опытных данных.

Таблица исходных опытных данных и результатов расчета

| Первый опыт | | | Второй опыт | | |
|---|------------------|----------------------|-------------|------------------|----------------------|
| Толщина $\delta_{01} = \dots$, $\delta_{02} = \dots$ мм, диаметр $D_{01} = \dots$, $D_{02} = \dots$ мм, масса $M_1 = \dots$, $M_2 = \dots$ г образцов | | | | | |
| τ , с | ΔE_T , К | $\ln(100\Delta E_T)$ | τ , с | ΔE_T , К | $\ln(100\Delta E_T)$ |
| 0 | | | 0 | | |
| 180 | | | 180 | | |
| 360 | | | 360 | | |
| 540 | | | 540 | | |
| 720 | | | 720 | | |
| 900 | | | 900 | | |
| 1080 | | | 1080 | | |
| 1260 | | | 1260 | | |
| 1440 | | | 1440 | | |
| 1620 | | | 1620 | | |
| 1800 | | | 1800 | | |

Обработка опытных данных

- 1 По результатам эксперимента, приведенным в таблице, строятся две графические зависимости $\ln(100 \times \Delta E_T) = f(\tau)$, примерный вид которых (для опытов с образцами из поролонa) приведен на рис. 2.
- 2 Точками A_1 и B_1 (аналогично A_2 и B_2) на графиках выделяются прямолинейные участки, соответствующие режиму регулярного охлаждения, и по координатам выделенных точек определяется величина темпа охлаждения для каждого опыта

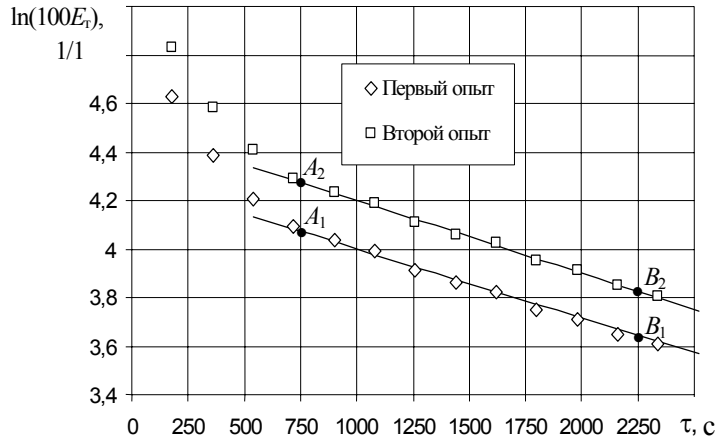


Рис. 2 Термограммы охлаждения в полулогарифмических координатах

$$m_1 = \frac{\ln A_1 - \ln B_1}{\tau_{B_1} - \tau_{A_1}}, \quad m_2 = \frac{\ln A_2 - \ln B_2}{\tau_{B_2} - \tau_{A_2}},$$

где τ_{A_1} и τ_{B_1} (τ_{A_2} и τ_{B_2}) – моменты начала и конца регулярного режима. Значения m_1 и m_2 не должны различаться более чем на 3 %.

- 3 Находятся средние значения толщины δ_0 , диаметра D_0 и темпа охлаждения $m = 0,5(m_1 + m_2)$.

- 4 Коэффициент теплопроводности λ образца рассчитывают по формуле

$$\lambda = \frac{\delta}{R - R_k}, \quad (1)$$

где δ – средняя толщина образцов, м; R – термическое сопротивление образца, $\text{м}^2\text{К/Вт}$; R_k – контактное термическое сопротивление между соприкасающимися поверхностями образца, ядра и прижимного блока, $\text{м}^2\text{К/Вт}$. Величина R_k является одной из констант прибора и определяется калибровкой бикалориметра по образцовым материалам (так называют материалы со стабильными по времени и точно измеренными величинами коэффициента λ). По паспорту прибора БП-63 $R_k = 0,0045 \text{ м}^2\cdot\text{К/Дж}$.

Параметр R для плоского бикалориметра зависит от темпа охлаждения m и от размеров и масс деталей бикалориметра, которые учитываются рядом постоянных прибора, определяемых экспериментально или расчетом для каждого конкретного прибора. Итак

$$R = \frac{1}{\Phi f(m/B - A)}, \quad (2)$$

где A – постоянная прибора, определяющая потери тепла ядром через боковую поверхность. Определена экспериментально калибровкой по материалу с известной теплопроводностью λ , $A = 0,89 \cdot 10^{-4}$, 1/с. Безразмерный параметр B зависит от объемной теплоемкости исследуемого материала и находится по формуле

$$B = \frac{1}{1 + \Gamma H}, \quad (3)$$

где Γ – параметр формы: $\Gamma = 2S/3C$; H – величина, определяемая свойствами образца: $H = \delta c_x \rho_x$ (c_x – удельная теплоемкость исследуемого материала, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, ρ_x – плотность исследуемого материала, $\text{кг}/\text{м}^3$). Постоянная прибора Φ определяется по формуле

$$\Phi = C/(2S),$$

где C – полная теплоемкость ядра, $\text{Дж}/\text{К}$; S – боковая поверхность ядра, соприкасающаяся с образцом, м^2 . Для бикалориметра ПБ-63 $C = 321 \text{ Дж}/\text{К}$; $S = 0,0113 \text{ м}^2$ и $\Phi = 14100 \text{ Дж}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$. Фактор рассеяния теплового потока через кольцевые прокладки f определяется по эмпирической формуле:

$$f = 0,4 + \frac{0,6}{\left(1 + \frac{2\delta}{D}\right)^2}, \quad (4)$$

где $D = 0,12 \text{ м}$ – диаметр ядра.

С учетом приведенных значений констант прибора формулы (3) и (2) принимают вид

$$B = \frac{1}{1 + 2,34 \cdot 10^{-5} H}; \quad (5)$$

$$R = \frac{10^{-3}}{14,1 \cdot f(m/B - 0,89 \cdot 10^{-4})}. \quad (6)$$

Теперь понятна методика обработки результатов эксперимента: сначала по массе образца m_0 и его размерам δ и D_0 находится плотность исследуемого материала

$$\rho_x = \frac{4m_0}{\pi D_0^2 \delta},$$

затем калориметрированием или любым другим способом должно быть определено значение удельной теплоемкости c_x для материала образца. Если сделать это затруднительно, то, учитывая, что даже существенная погрешность в определении величины c_x мало отражается на точности определения λ , можно принимать ориентировочные значения $c_x = 1700$ Дж/(кг·К) для материалов органического происхождения и $c_x = 850$ Дж/(кг·К) для неорганических материалов.

Далее рассчитываем $H = \delta c_x \rho_x$, а затем по формулам (4) и (5) – значения параметров f и B , после чего по формуле (6) находим величину R , и только тогда по формуле (1) – значение λ .

Анализ и выводы

Чтобы составить суждение о достоверности и точности результатов наших измерений полезно, обратившись к справочным таблицам, например в [4], выписать значения λ для материалов примерно такого же класса. Примерное совпадение значений λ будет свидетельствовать о достоверности полученных в опыте результатов. Подробный анализ методических погрешностей эксперимента из-за достаточно сложных расчетных зависимостей затруднен, однако в паспорте прибора погрешность измерения по описанной методике оценивается величиной $\pm 10\%$.

Список литературы

- 1 Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М., 1981. 416 с.
- 2 Осипова В.А. Экспериментальные исследования процессов теплообмена. М., 1979. 392 с.
- 3 Краснощеков Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче. М., 1980. 228 с.
- 4 Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. М., 1954. 408 с.
- 5 Бегункова А.Ф., Емченко М.П. Плоский бикалориметр ПБ-63. Описание и конструкция. Л., 1969. 12 с.

Лабораторная работа 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ПУЗЫРЬКОВОМ КИПЕНИИ ЖИДКОСТИ

Цель работы: Опытным путем определить величину коэффициента теплоотдачи α при пузырьковом кипении жидкости в большом объеме при разных тепловых нагрузках q . Выявить связь между α и q , сравнить результаты измерений с данными из литературных источников.

Основы теории

Коэффициент теплоотдачи α определяет количество теплоты, переданное единицей поверхности твердого тела в окружающую жидкую или газообразную среду (или наоборот – от среды в стенку) за единицу времени при разности температур между поверхностью и жидкостью в один градус. Это одна из важнейших характеристик процесса теплоотдачи, учитывающая все его особенности, включая теплофизические свойства жидкости и любые режимные и геометрические факторы, влияющие на характер движения жидкости. Знание величины α совершенно необходимо при инженерных расчетах процессов теплообмена. Особенности теплоотдачи при пузырьковом кипении жидкости и методы расчетов величины α подробно описаны в учебной литературе [1], [3]. Этому же вопросу посвящен и ряд специальных монографий [4] – [7].

В соответствии с законом Ньютона – Рихмана передаваемый тепловой поток Q при теплоотдаче определяется формулой

$$Q = \alpha(t_c - t_{ж})F, \quad (1)$$

где t_c и $t_{ж}$ – температуры стенки и окружающей жидкости, К; F – величина поверхности теплообмена, м².

Из формулы (1) получаем формулу для расчета α :

$$\alpha = \frac{Q}{F(t_c - t_{ж})}, \quad (2)$$

которая и составляет теоретическую основу планируемого исследования. Если опытным путем определить все величины, стоящие в правой ее части, то легко найти и значение α , как результат косвенных измерений.

Обычно в опытных установках нагрев производится с помощью электронагревателя, и тогда количество подведенного за единицу времени тепла Q определяют по мощности электронагревателя:

$$Q = UiK_{п}, \quad (3)$$

где U – падение напряжения на нагревателе, В; i – ток в цепи, А; $K_{п}$ – некий коэффициент, учитывающий потери тепла, выделяемого нагревателем, в окружающую среду. Величину этого коэффициента определяют специальной калибровкой экспериментальной установки. Для установки с дополнительным обогревательным сосудом по нашим измерениям получено $K_{п} = 0,86$. Температуры t_c и $t_{ж}$ обычно определяются с помощью термпар или термометров сопротивления, величину поверхности теплообмена F находят по результатам измерения соответствующих линейных размеров.

Первоначальную стадию кипения, которая начинается тогда, когда t_c становится выше, чем температура $t_{п}$, но температура воды в основной своей массе еще не достигла температуры кипения $t_{п}$, называют пристенным кипением. При этом мелкие пузырьки пара, возникающие на поверхности нагрева, отрываясь от нее, начинают всплывать, но на пути вверх снова практически все конденсируются.

При пузырьковом кипении воды в атмосферных условиях различают две области кипения. В первой области при малых температурных напорах ($\Delta t \leq 5$ °С) значения коэффициента теплоотдачи невелики и определяются условиями свободной конвекции в однофазной жидкости. Во второй области при повышенных температурных

напорах ($5 \leq \Delta t \leq 25$ °С) коэффициент теплоотдачи значительно возрастает. Это связано с интенсивной конвекцией жидкости вследствие возникновения, роста, отрыва и движения паровых пузырей. Для воды в диапазоне давлений $p/p_{кр} \leq 0,18$ для расчета α применяется эмпирическая формула, полученная обработкой опытных данных [2]:

$$\alpha = 3,15 (10p_n)^{0,15} q^{0,7}, \quad (4)$$

где $q = Q/F$ – плотность теплового потока, Вт/м²; p_n – давление насыщения при температуре $t_{ж}$, МПа.

При очень больших температурных напора или тепловых нагрузках возникает кризис кипения и такое кипение называют пленочным (при атмосферном давлении $\Delta t_{кр} = 25$ К, $q_{кр} = 1,2 \cdot 10^6$ Вт/м²). При таком режиме число центров парообразования становится настолько огромным, что стенка как бы отделяется от кипящей жидкости пленкой пара, в результате чего коэффициент теплоотдачи резко уменьшается, а температура стенки значительно возрастает по сравнению с t_n .

Экспериментальная установка и методика измерений

Общий вид экспериментальной установки приведен на рис. 1. На передней панели находятся: многоканальный измеритель температуры 4 типа УКТ38-В-04 с выключателем 5, подключенный к трем хромель-копелевым термопарам (см. позиции 4 и 5 на рис. 2); универсальный мультиметр 7 типа МУ-68 с автоматическим переключением пределов измерений; выключатель электропитания установки 1; разъемы 1 для подключения мультиметра; тумблер 3 для переключения мультиметра на измерение падения напряжения U_o на образцовом сопротивлении R_o или напряжения U_n на рабочем нагревателе. Питание рабочего нагревателя осуществляется от ЛАТРа 6. Изменение мощности дополнительного электронагревателя осуществляется регулятором мощности 2.

На рис. 2 приведена схема внутреннего устройства лабораторной установки, включая и электрическую схему питания рабочего нагревателя, и схему измерений. Нагреваемый медный цилиндр 7 с рабочим нагревателем находится в цилиндрической стеклянной емкости 6, заполненной дистиллированной водой. Эта емкость частично погружена в водоподогреватель 8 с дополнительным электронагревателем 9, питание на который приходит от регулятора мощности 1. Рабочий нагреватель соединяется проводами 3 с лабораторным автотрансформатором. Последовательно с этим нагревателем включено образцовое сопротивление R_o для определения величины электрического тока в цепи по измеренному значению падения напряжения на нем. Переключатель 2 позволяет использовать универсальный прибор МУ-68 для измерения падения напряжения на рабочем нагревателе U_n и на образцовом сопротивлении U_o . В этом случае выделяемая мощность (а значит и тепловой поток) определяется по формуле:

$$Q = U_n (U_o/R_o) K_n, \quad (5)$$

где U_n – падение напряжения на рабочем нагревателе, В; U_o – падение напряжения на образцовом сопротивлении R_o , В.

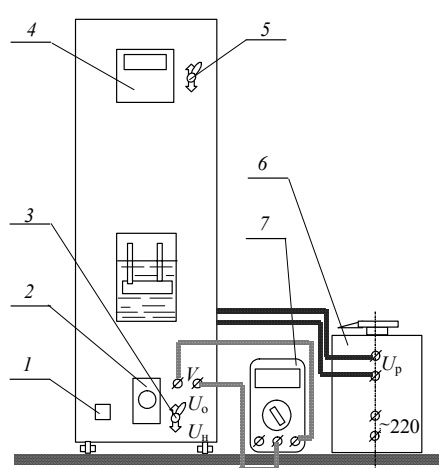


Рис. 1 Экспериментальная установка

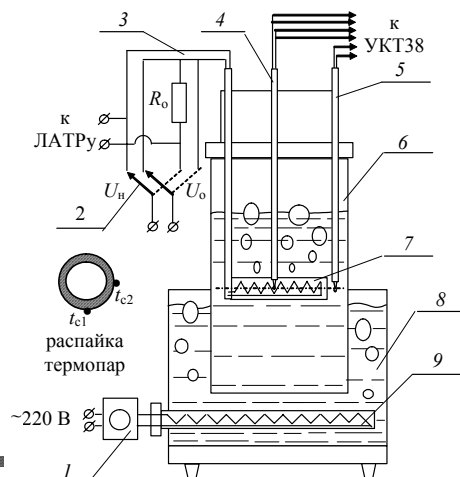


Рис. 2 Внутреннее устройство установки

Внутри медного цилиндра установлены две термопары, подведенные снизу с помощью трубки 4. Спаи термопар находятся в непосредственной близости от внешней поверхности пластины. Для измерения температуры кипящей воды в емкости 6 вблизи поверхности пластины размещена третья термопара 5. Предварительный подогрев воды до 80...90 °С в емкости 7 производится благодаря работе нагревателя 9. В процессе опытов температура воды здесь доводится до температуры кипения, и это позволяет значительно уменьшить (но не исключить полностью) тепловые потери от рабочей стеклянной емкости 6 в окружающую среду.

Подготовка установки к работе

1 Проверить уровень воды в водоподогревателе 8. При необходимости отвернуть крышку и заполнить его на 2/3 водой.

2 Проверить уровень воды в емкости 6. При необходимости приподнять крышку и наполнить ее на 2/3 дистиллированной водой.

3 Убедиться в том, что термоэлектроды термопар подсоединены к измерителю температуры, а электроподводы к нагревателю надежно изолированы.

4 Визуально проверить наличие заземления установки и ЛАТРа.

Порядок выполнения работы

1 Записать данные установки, а также внешние условия проведения опытов.

| | |
|------------------------------------|--------------------------------------|
| Размеры медного цилиндра | $d = 21$ мм, $L = 120$ мм. |
| Образцовое сопротивление | $R_0 = 0,1$ Ом. |
| Сопротивление рабочего нагревателя | $R_n = 12,5$ Ом. |
| Температура окружающего воздуха | $t_b = \underline{\hspace{2cm}}$ °С. |
| Барометрическое давление | $B = \underline{\hspace{2cm}}$ МПа. |

2 Убедиться в том, что все приборы выключены. Повернуть регулятор напряжения ЛАТРа против часовой стрелки до упора. Подключить вилку сетевого шнура ЛАТРа и установки к сетевой розетке. Подключить мультиметр 5 к установке через разъемы V на передней панели.

3 Включить стенд тумблером 1 и измеритель температуры 4 тумблером 5 (здесь и далее все позиции по рис. 1).

4 Включить регулятор мощности 2 дополнительного нагревателя поворотом ручки по часовой стрелке примерно на половину оборота.

5 Наблюдать за нагревом дистиллированной воды. Через 10...15 минут вода в стеклянной емкости должна нагреться до 60...70 °С. Процесс нагрева контролировать по измерителю температуры 4 (1-я термопара).

6 Переключатель мультиметра МУ-68 установить в положение измерений переменного напряжения. Переключить тумблер 3 на измерение U_n – падения напряжения на рабочем нагревателе.

7 Установить выходное напряжение на ЛАТРе около 60 В, пользуясь показаниями мультиметра 7.

8 С помощью двух включенных нагревателей выйти на режим пузырькового кипения, наблюдая этот процесс визуально и следя за показаниями измерителя температур 4.

9 При достижении $t_n = 98...99$ °С и $t_c = 103...105$ °С (показания 2-й и 3-й термопар) уменьшить мощность, подводимую к дополнительному нагревателю, поворотом ручки 2 против часовой стрелки до минимума (добиваясь $t_n = \text{const}$).

10 Установить температурный напор $\Delta t \leq 5$ °С, изменяя выходное напряжение ЛАТРа.

11 При достижении установившегося режима записать значения t_n и t_{c1} , t_{c2} в таблицу исходных опытных данных. Произвести отсчет падения напряжения на рабочем нагревателе U_n по мультиметру 7, записывая показания прибора в таблицу. Переключить тумблер 3 в положение U_0 . Произвести отсчет падения напряжения U_0 на образцовом сопротивлении, записать показания в таблицу.

12 Изменить условия опыта, увеличив мощность рабочего нагревателя на 10...15 %, дождаться установившегося режима и повторить соответствующие измерения t_n , t_c , U_n и U_0 .

13 Провести измерения t_n , t_c , t_{c2} , U_n и U_0 еще на двух-трех режимах кипения.

Таблица исходных опытных данных и результатов расчета

| № | Исходные данные | | | | | Результаты расчетов | | |
|---|-----------------|---------------|---------------|-----------|-----------|-------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| | t_n , °С | t_{c1} , °С | t_{c2} , °С | U_p , В | U_0 , В | q , Вт/м ² | α , Вт/м ² К | α/α_p , 1/1 |
| 1 | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | |

Обработка результатов эксперимента

1 По формуле (5) рассчитать величину Q .

2 Рассчитать среднее значение температуры стенки $t_c = (t_{c1} + t_{c2})/2$.

3 По формуле $q = Q/F$ рассчитать значение q .

4 По формуле (2) найти значение α .

5 По формуле (4) рассчитать значение $\alpha_{\text{рас}}$.

6 Найти отношение $\alpha/\alpha_{\text{рас}}$.

7 Результаты расчетов для всех режимов занести в таблицу.

Анализ и выводы

Представляет определенный интерес сравнить полученные нами экспериментально значения α с величи-

нами, рассчитанными по эмпирической формуле (4). При этом следует понимать, что полученная нами невязка содержит как погрешности аппроксимации опытных данных, полученных разными исследователями, при расчете показателей степеней в формуле (4), так и инструментальные погрешности всех проведенных опытов. Заметим, что точность формулы (4) оценивается авторами в пределах $\pm 30\%$.

Оценим предельную погрешность проведенных измерений, используя известную методику такой оценки [6].

Для формулы

$$\alpha = \frac{U_n U_o K_n}{F (t_c - t_{ж}) R_o},$$

которая получена объединением формул (2) и (5), максимально возможная относительная ошибка определяется суммой абсолютных значений максимальных относительных ошибок сомножителей

$$\delta\alpha_{\max} = |\delta U_n| + |\delta R_o| + |\delta F| + |\delta t_c| + |\delta t_{ж}| + |\delta U_o|. \quad (6)$$

Оценим величину каждого слагаемого. По паспорту прибора МУ-68 его максимальная погрешность при измерении переменного напряжения на всех диапазонах измерений составляет $\delta U_n = 0,8\%$. Точность измерения величины R_o также оценим по точности измерения ее прибором МУ-68: при измерениях электрического сопротивления на всех диапазонах прибора $\delta R_o = 0,8\%$. Из паспорта измерителя температуры УКТ38-В-04 находим, что точность измерения температур в диапазоне $0 \dots 200^\circ\text{C}$ составляет $\delta t_c = \delta t_{ж} = \pm 0,5\%$. Абсолютную погрешность измерения линейных размеров примем как для штангенциркуля с длиной замеров 150 мм: $\Delta = \pm 0,1$ мм. Тогда относительные погрешности измерения d и L будут $\delta d = 0,1/16 \cdot 100 = 0,62\%$ и $\delta L = 0,1/95 \cdot 100 = 0,1\%$, а погрешность измерения F соответственно $\delta F = |\delta d| + |\delta L| = 0,62 + 0,1 = 0,72\%$. Складывая полученные значения, по формуле (6) найдем $\delta\alpha_{\max}$.

Если проводить исследования с достаточно большими сериями параллельных опытов, то относительные погрешности каждого из опытов будут отличаться от максимально возможных и распределяться случайным образом. Тогда действительная погрешность измерений будет определяться величиной среднеквадратичной погрешности

$$\bar{\delta\alpha} = \sqrt{\frac{\delta U_n^2 + \delta R_o^2 + \delta F^2 + \delta t_c^2 + \delta t_{ж}^2 + \delta U_o^2}{5}},$$

которую можно принимать за наиболее вероятную погрешность результатов измерений.

Список литературы

- 1 Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М., 1981. 479 с.
- 2 Мухачев Г.А., Шукин В.К. Термодинамика и теплопередача. М., 1991. 480 с.
- 3 Ляшков В.И. Теоретические основы теплотехники. М., 2005. 260 с.
- 4 Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. М., 1986. 448 с.
- 5 Кутателадзе С.С. Избранные труды / Отв. ред. В.Е. Накоряков. Новосибирск, 1989. 427 с.
- 6 Дорошук В.С. Кризисы теплообмена при кипении воды в трубах. М., 1983. 119 с.
- 7 Лабораторный практикум по термодинамике и теплопередаче / Под ред. В.И. Крутова и Е.В. Шишова. М., 1988. 216 с.

Лабораторная работа 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ТЕПЛООБМЕННИКЕ ТИПА "ТРУБА В ТРУБЕ"

Цель работы: Экспериментально определить величину коэффициента теплопередачи k и зависимость этого коэффициента от скорости движения и температур теплоносителей в теплообменнике типа "Труба в трубе". Для одного из режимов сравнить экспериментальное значение k с расчетным значением, полученным при использовании соответствующих критериальных уравнений для расчета коэффициентов теплоотдачи.

Основы теории

Теплопередачей называют перенос тепла от одной жидкой или газообразной среды (от одного теплоносителя) к другой аналогичной среде (к другому теплоносителю) через разделяющую их твердую стенку. Стенка может быть как однослойной, так и многослойной, составленной из материалов с разными теплофизическими свойствами.

Коэффициент теплопередачи k представляет собой количество теплоты, передаваемой через единицу изотермической поверхности за единицу времени при температурном напоре между теплоносителями в один градус. Это одна из важнейших расчетных характеристик аппарата, определяющая его эффективность и качество. Знание величины k совершенно необходимо при тепловых расчетах оборудования.

Теоретической основой метода измерения является основное уравнение стационарной теплопередачи, описываемое формулой [1, 2]:

$$Q = k\Delta t_{\text{ср}}F,$$

где Q – передаваемый тепловой поток, Вт; Δt_{cp} – среднелогарифмический температурный напор, К; F – величина поверхности теплообмена, м².

Выразим из приведенной формулы коэффициент теплопередачи k :

$$k = \frac{Q}{\Delta t_{cp} F}. \quad (1)$$

Теперь видно, что значение k легко можно получить как результат косвенных измерений, если опытным путем определить значения всех параметров, входящих в правую часть формулы (1).

Величину передаваемого теплового потока определим, записав уравнение теплового баланса

$$Q = Q_1 = Q_2 + Q_{2пот}, \quad (2)$$

где Q_1 – количество тепла, переданное за 1 с от горячего теплоносителя в стенку, Вт; Q_2 – количество тепла, полученное за 1 с холодным теплоносителем от стенки, Вт; $Q_{2пот}$ – тепловые потери от наружной поверхности теплообменника в окружающую среду за 1 с. Для определения величин Q_1 и Q_2 достаточно измерить расходы теплоносителей и их температуры на входе и выходе теплообменника:

$$Q_1 = G_1 \rho_1 c_{p1} (t_{11} - t_{12});$$

$$Q_2 = G_2 \rho_2 c_{p2} (t_{22} - t_{21}),$$

где G_1, G_2 – объемные расходы горячего и холодного теплоносителей, м³/с; ρ_1 и ρ_2 – плотности теплоносителей, кг/м³; c_{p1} и c_{p2} – удельные массовые теплоемкости теплоносителей, Дж/(кг·К); t_{11} и t_{21} – температуры горячего и холодного теплоносителей на входе в теплообменник, °С; t_{12} и t_{22} – температуры горячего и холодного теплоносителей на выходе из теплообменника, °С.

Экспериментальная установка и методика экспериментов

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Установка включает следующее основное лабораторное оборудование и приборы:

- термостат 1, предназначенный для нагрева, а потом и поддержания постоянства температуры t_{11} воды на входе в теплообменник и прокачки ее по внутренней трубе теплообменника;
- резиновые шланги 3 для горячей воды и воздуха;
- регулировочные устройства 4, позволяющие изменять расходы теплоносителей;
- теплообменник 12 типа "Труба в трубе" с двумя коленами;

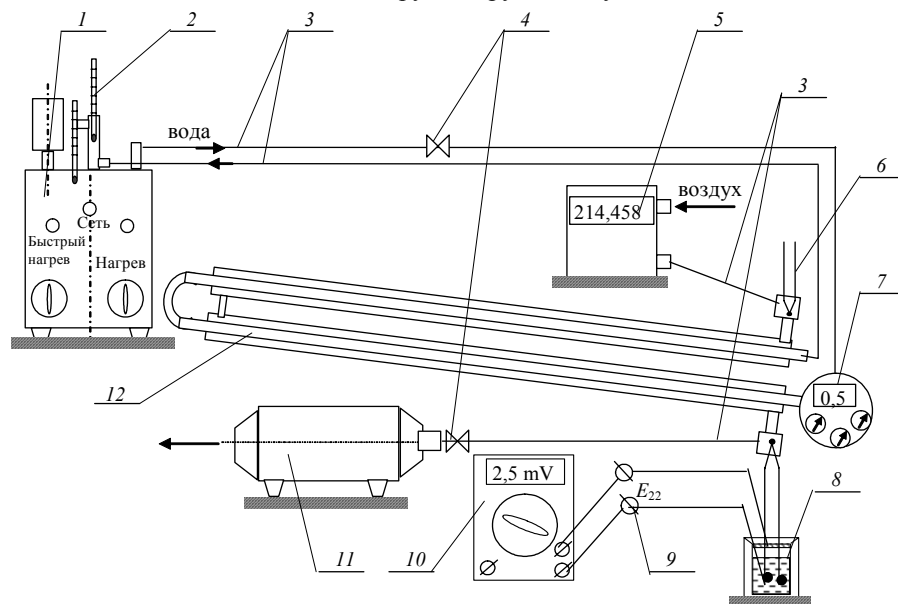


Рис. 1 Схема экспериментальной установки

- сосуд Дьюара 8, служащий для поддержания температуры свободных спаев термопар при температуре 0 °С (заполняется водой с тающим льдом);
- газовый счетчик 5;
- водяной счетчик 7;
- вентилятор 11 для просасывания воздуха через кольцевое сечение теплообменника;
- хромель-копелевые термопары 6 для измерения температур t_{21} и t_{22} воздуха;
- термометры 2 для измерения температур t_{11} и t_{12} воды;
- клеммы 9 для подключения мультиметра 10, с помощью которого измеряют термоЭДС термопар.

Вода, нагретая в термостате до температуры t_{11} (45...65 °С), с помощью насоса, установленного в термостате, по резиновым шлангам 3 подается на вход внутренней трубки теплообменника. Протекая там, она отдает часть своего тепла теплопередачей подогреваемому воздуху, который просасывается вентилятором 11 через

межтрубное пространство теплообменника. Нагретый воздух с температурой t_{22} уходит в атмосферу, а вода из теплообменника с температурой t_{12} возвращается в термостат.

Геометрические размеры теплообменника

| № | Название и обозначение размера | Значение |
|---|--|----------|
| 1 | Наружный диаметр наружной трубы D_2 , мм | 27 |
| 2 | Внутренний диаметр наружной трубы d_2 , мм | 22 |
| 3 | Наружный диаметр внутренней трубы D_1 , мм | 12 |
| 4 | Внутренний диаметр внутренней трубы d_1 , мм | 9 |
| 5 | Общая длина двух колен L , м | 2 |

Эксперимент проводится в следующей последовательности:

- 1 Проверяют наличие и уровень воды в термостате.
- 2 Включают термостат 1 и с помощью задающего ртутного контактного термометра устанавливают требуемую для первого измерения температуру (40...50 °С). Для ускорения нагрева при этом рекомендуется включить дополнительный электронагреватель термостата. При достижении заданной температуры (погаснет индикаторная лампочка справа) этот нагреватель следует отключить.
- 3 После выхода термостата на режим поддержания постоянной температуры включают вентилятор 2 и дожидаются установившегося режима теплообмена. При выходе на такой режим температура t_{22} перестает меняться по времени.
- 4 С помощью секундомера и счетчиков расхода воды и газа определяют расходы теплоносителей за некоторые промежутки времени, записывая показания приборов в таблицу исходных опытных данных.
- 5 С помощью лабораторных ртутных термометров измеряют температуры t_{11} и t_{12} воды, а с помощью мультиметра 9 измеряют термоЭДС E_{21} и E_{22} термопар, установленных на воздушном тракте.
- 6 Задающим термометром устанавливают новую температуру опыта (50...60 °С), регулируемыми устройствами 4 уменьшают расход воды или воздуха и повторяют все перечисленные выше действия, записывая в таблицу исходных опытных данных результаты этого второго опыта.
- 7 При необходимости и наличии достаточного времени аналогично проводят третий опыт при температуре 60...70 °С.

Таблицы исходных опытных данных (в качестве примера здесь и в следующем параграфе приводятся данные и обработка одного из опытов, проведенных при отладке установки).

Расход теплоносителей

| № опыта | Счетчик воды | | | Счетчик газа | | |
|---------|----------------------|----------------------|--------------------|------------------------|------------------------|--------------------|
| | $Z_{1нач}, \text{Л}$ | $Z_{1кон}, \text{Л}$ | $\tau_1, \text{с}$ | $Z_{2нач}, \text{М}^3$ | $Z_{2кон}, \text{М}^3$ | $\tau^2, \text{с}$ |
| 1 | 2,0 | 6,0 | 114 | 134,760 | 134,790 | 49 |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |

Температура теплоносителей

| № опыта | Вода | | Воздух | | | |
|---------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------------|---------------------|---------------------|
| | $t_{11}, \text{°C}$ | $t_{12}, \text{°C}$ | $E_{21}, \text{МВ}$ | $B_B = \text{гПа}, t_B = \text{°C}$ | $E_{22}, \text{МВ}$ | $t_{22}, \text{°C}$ |
| 1 | 51,3 | 50,9 | 1,5 | 22,9 | 2,5 | 37,64 |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |

Обработка опытных данных

1 По эмпирической формуле, полученной в результате аппроксимации стандартной калибровочной таблицы для термопары X – K, по величинам термоЭДС рассчитываем температуры воздуха на входе и выходе из теплообменника, занося полученные результаты в таблицу:

$$t_{21} = 0,8401 + 14,723E_{21} = 0,8401 + 14,723 \cdot 1,5 = 22,9 \text{ °C};$$

$$t_{22} = 0,8401 + 14,723E_{22} = 0,8401 + 14,723 \cdot 2,5 = 37,64 \text{ °C}.$$

2 Средние температуры воды и воздуха

$$\bar{t}_1 = (t_{11} + t_{12})/2 = (51,3 + 50,9)/2 = 51,1 \text{ °C};$$

$$\bar{t}_2 = (t_{21} + t_{22})/2 = (22,9 + 37,64)/2 = 30,2 \text{ °C},$$

3 Объемный расход воды

$$G_1 = (Z_{1кон} - Z_{1нач}) \cdot 10^{-3} / \tau_1 = (6 - 2) \cdot 10^{-3} / 114 = 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}.$$

4 Объемный расход воздуха

$$G_2 = (Z_{2кон} - Z_{2нач}) / \tau_2 = (134,790 - 134,760) / 49 = 6,12 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}.$$

5 Массовый расход воздуха определяем, записав на основании уравнения состояния идеальных газов

$$M_2 = \frac{BG_2}{RT_{12}},$$

где B – барометрическое давление воздуха, Па; R – газовая постоянная воздуха, $R = 287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$. Подставляя значения параметров, находим (при $B = 1009 \text{ гПа}$):

$$M_2 = \frac{100900 \cdot 6,12 \cdot 10^{-4}}{287 \cdot (22,9 + 273)} = 7,25 \cdot 10^{-4} \text{ кг/с}.$$

6 Учитывая, что в интервале температур 0...100 °C удельная массовая теплоемкость воздуха $c_{pm} = 1005 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ [3], находим количество тепла, полученное за единицу времени воздухом

$$Q_2 = M_2 c_{pm} (t_{22} - t_{21}) = 7,25 \cdot 10^{-4} \cdot 1005 \cdot (37,65 - 22,9) = 10,7 \text{ Вт}.$$

Отметим, что это только то тепло, которое пошло на нагрев воздуха. Однако через теплопередающую поверхность внутренней трубки было передано еще и тепло $Q_{2пот}$, которое ушло в окружающую среду в результате свободной конвекции на наружной поверхности наружной трубы. В соответствии с законом Ньютона-Рихмана количество этого тепла будет

$$Q_{2пот} = \alpha_{нар} (t_{с.нар} - t_{21}) F_{нар}, \quad (3)$$

где $\alpha_{нар}$ – коэффициент теплоотдачи к наружному воздуху, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $t_{с.нар}$ – средняя температура наружной поверхности наружной трубы, °C; $F_{нар}$ – площадь теплоотдающей поверхности, м^2 . С приемлемой точностью будем считать, что

$$t_{с.нар} = t_{21} + ((\bar{t}_2 - t_{21}) / 2) = 22,9 + (30,2 - 22,9) / 2 = 26,4 \text{ °C}.$$

Поверхность теплообмена с окружающим воздухом

$$F_{нар} = \pi D_2 L = 3,1416 \cdot 0,027 \cdot 2 = 0,1696 \text{ м}^2.$$

Чтобы найти $\alpha_{нар}$, рассчитаем сначала значение критерия Грасгофа

$$\text{Gr} = \frac{g D_2^3 \beta (\bar{t}_2 - t_{21})}{\nu^2},$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение силы тяжести; ν – коэффициент кинематической вязкости, м/с^2 ; β – коэффициент объемного расширения, $1/\text{К}$. Для воздуха при температуре $22,9 \text{ }^\circ\text{С}$ величина $\nu = 15,5 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}^2$ (см. [4]), а $\beta = 1/(t_{21} + 273) = 1/(22,9 + 273) = 0,00338 \text{ 1/К}$. Итак,

$$\text{Gr} = \frac{9,81 \cdot 0,027^3}{(15,5 \cdot 10^{-6})} \cdot 0,00338 \cdot (26,4 - 22,9) = 9319.$$

Критериальное уравнение теплоотдачи при свободной конвекции для горизонтальной трубы известно [1]:

$$\text{Nu} = 0,5 \cdot (\text{PrGr})^{0,25},$$

где Pr – значение критерия Прандтля. Для воздуха $\text{Pr} = 0,7$ [4]. Тогда

$$\text{Nu} = 0,5 \cdot (0,7 \cdot 9319)^{0,25} = 4,49.$$

Наконец, разыскав в справочной таблице значение коэффициента теплопроводности воздуха при температуре $22,9 \text{ }^\circ\text{С}$ $\lambda_{\text{в}} = 0,026 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, находим

$$\alpha_{\text{нар}} = \frac{\text{Nu} \lambda_{\text{в}}}{D_2} = \frac{4,49 \cdot 0,026}{0,026} = 4,67 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Тогда по формуле (3) находим

$$Q_{2\text{пот}} = 4,67 \cdot (26,4 - 22,9) \cdot 0,1696 = 2,77 \text{ Вт}.$$

7 Рассчитываем переданный тепловой поток

$$Q = Q_2 + Q_{2\text{пот}} = 10,71 + 2,77 = 13,48 \text{ Вт}.$$

8 Определяем среднелогарифмический температурный напор, изобразив сначала схему противотока (см. рис. 2).

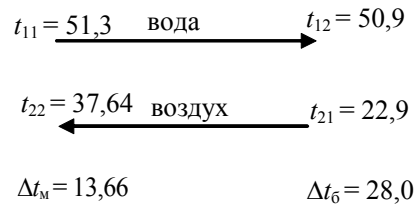


Рис. 2 Схема противотока

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}} = \frac{28 - 13,66}{\ln \frac{28}{13,66}} = 19,98 \text{ }^\circ\text{С}.$$

9 Рекомендуется за теплопередающую поверхность трубы принимать ту, со стороны которой коэффициент теплоотдачи α меньше. В нашем случае это D_1 . Тогда

$$F = \pi D_1 L = 3,1416 \cdot 0,012 \cdot 2 = 7,53 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2.$$

10 Находим значение коэффициента теплопередачи по формуле (1):

$$k = \frac{13,48}{19,98 \cdot 7,53 \cdot 10^{-2}} = 8,95 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Анализ и выводы

Представляет интерес сравнить полученную величину коэффициента теплопередачи k с величиной $k_{\text{расч}}$, определяемой по известной формуле

$$k_{\text{расч}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (4)$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи от воды к поверхности теплообмена и от этой поверхности к воздуху, $\text{Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$; δ – толщина стенки, м ; λ – коэффициент теплопроводности стали, $\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$. В нашем случае $\delta = 0,0015 \text{ м}$, $\lambda = 40 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

Чтобы определить значения коэффициентов α_1 и α_2 , следует воспользоваться соответствующими критериальными уравнениями. Для этого находим сначала скорость воды во внутренней трубе

$$w_1 = \frac{G_1}{F_1} = \frac{4 \cdot G_1}{\pi d_1^2} = \frac{4 \cdot 3,5 \cdot 10^{-5}}{3,1416 \cdot 0,009^2} = 0,55 \text{ м/с}.$$

Далее рассчитываем значение критерия Рейнольдса

$$\text{Re}_1 = \frac{w_1 d_1}{\nu_1},$$

где ν_1 – коэффициент кинематической вязкости воды при температуре \bar{t}_1 . По справочным таблицам из [4] при $\bar{t}_1 = 51,1 \text{ }^\circ\text{С}$ $\nu_1 = 0,53 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}^2$. Тогда

$$Re_1 = \frac{0,55 \cdot 0,009}{0,53 \cdot 10^{-6}} = 9339.$$

Формально это соответствует переходным режимам, но, учитывая, что величина Re мало отличается от критического значения ($Re_{кр} = 10\,000$), не внося заметной погрешности, расчеты будем вести как для турбулентного режима по критериальному уравнению

$$Nu_1 = 0,021 Re_1^{0,8} Pr_{ж1}^{0,43} \left(\frac{Pr_{ж1}}{Pr_{ст1}} \right)^{0,25}.$$

Здесь значения критерия Прандтля для воды берутся по температуре \bar{t}_1 и температуре стенки со стороны горячей жидкости, которую с приемлемой точностью можно рассчитать по формуле

$$t_{ст1} = \bar{t}_1 - \Delta t_{cp}/2 = 51,1 - 19,98/2 = 41,2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

При этих температурах из той же таблицы находим $Pr_{ж} = 3,5$, $Pr_{ст} = 4,3$. Теперь находим

$$Nu = 0,021 \cdot 9339^{0,8} \cdot 3,5^{0,43} \left(\frac{3,5}{4,3} \right)^{0,25} = 51,3.$$

Тогда расчетное значение α_1 будет

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_1}{d_1} = \frac{51,3 \cdot 0,649}{0,009} = 3699 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)},$$

где величина $\lambda_1 = 0,649 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ найдена для температуры \bar{t}_1 по уже упомянутой таблице теплофизических свойств воды.

Найдем теперь величину коэффициента теплоотдачи α_2 от внутренней трубы к нагреваемому воздуху. Для этого находим скорость воздуха в кольцевом канале

$$w_2 = \frac{G_2}{F_2} = \frac{4G_2}{\pi(d_2^2 - D_1^2)} = \frac{4 \cdot 6,12 \cdot 10^{-4}}{3,1416 \cdot (0,022^2 - 0,012^2)} = 2,29 \text{ м/с}.$$

Эквивалентный диаметр кольцевого сечения

$$d_{32} = d_2 - D_1 = 0,022 - 0,012 = 0,01 \text{ м}.$$

Средняя температура холодного теплоносителя (воздуха)

$$\bar{t}_2 = (t_{21} + t_{22})/2 = (22,9 + 37,64)/2 = 30,3 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

При такой температуре кинематическая вязкость воздуха (находим по справочным таблицам [4]) будет $\nu_2 = 16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Рассчитываем число Рейнольдса

$$Re_2 = \frac{w_2 d_{32}}{\nu_2} = \frac{2,29 \cdot 0,01}{16 \cdot 10^{-6}} = 1431.$$

Значение $Re_2 < 2300$, значит режим движения воздуха в кольцевом канале ламинарный.

Известно, что при ламинарном движении течение может быть вязкостным или вязкостно-гравитационным. Чтобы установить это, необходимо определить значения критериев Прандтля и Грасгофа. Из упомянутой выше таблицы для воздуха находим $Pr^2 = 0,7$. Рассчитываем значение критерия Грасгофа

$$Gr_2 = \frac{g d_{32}^3}{\nu_2^2} \beta (\bar{t}_{с2} - \bar{t}_2),$$

где $\beta = 1/(\bar{t}_2 + 273)$ – коэффициент объемного расширения; $\bar{t}_{с2}$ – средняя температура стенки со стороны холодного теплоносителя, $^\circ\text{C}$. Обычно величину этой температуры в первом приближении находят через среднелогарифмический температурный напор

$$\bar{t}_{с2} = \bar{t}_2 + \Delta t_{cp} / 2 = 30,3 + 19,98 / 2 = 40,3 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Тогда

$$Gr_2 = \frac{9,81 \cdot 0,01^3}{(16 \cdot 10^{-6})^2} \cdot \frac{1}{30,3 + 273} \cdot (40,3 - 30,3) = 1264,7.$$

Поскольку $(Pr_2 \cdot Gr_2) = (0,7 \cdot 1264,7) < 8 \cdot 105$, течение вязкостное. Для такого течения критериальное уравнение будет [2]

$$Nu_2 = 1,55 \cdot \left(Pe_2 \frac{d}{l} \right)^{0,33} \left(\frac{\mu_{ж2}}{\mu_{с2}} \right)^{0,14},$$

где Pe – критерий Пекле; d и l – геометрические размеры канала; $\mu_{ж}$ и $\mu_{с}$ – коэффициенты динамической вязкости теплоносителя при температурах жидкости и стенки, соответственно. Для воздуха при температуре $30,3 \text{ } ^\circ\text{C}$ из таблицы его теплофизических свойств [4] находим $\mu_{ж} = 18,6 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$, а при температуре $40,3 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\mu_{с} = 19,1 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$.

Произведение $\left(Pe_2 \frac{d}{l} \right)$ удобнее определять через расход теплоносителя [4]

$$\left(Pe_2 \frac{d}{l} \right) = \frac{4G_2 c_{p2}}{\pi l \lambda},$$

где c_{p2} – средняя теплоемкость теплоносителя, для воздуха $c_{p2} = 1005$ Дж/(кг·К); λ – коэффициент теплопроводности воздуха, $\lambda = 0,027$ Вт/(м·К). Итак, находим

$$\left(\text{Pe}_2 \frac{d}{l}\right) = \frac{4 \cdot 7,25 \cdot 10^{-4} \cdot 1005}{3,1416 \cdot 2 \cdot 0,027} = 17,2.$$

Рассчитываем число Nu_2 по приведенному выше критериальному уравнению:

$$\text{Nu}_2 = 1,55 \cdot (17,2)^{0,33} \left(\frac{18,6 \cdot 10^{-6}}{19,1 \cdot 10^{-6}}\right)^{0,14} = 3,98.$$

Теперь находим α_2 :

$$\alpha_2 = \frac{\text{Nu}_2 \cdot \lambda_2}{d_{s2}} = \frac{3,98 \cdot 0,027}{0,01} = 10,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Рассчитываем коэффициент теплопередачи по формуле (4)

$$k_{\text{расч}} = \frac{1}{\frac{1}{3699} + \frac{0,0015}{40} + \frac{1}{10,8}} = 10,57 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Невязка по сравнению с экспериментальным значением

$$k_{\text{расч}} / k = 10,57/8,95 = 1,18.$$

Осмысливая полученный результат, следует принимать во внимание, что критериальные уравнения, использованные при расчетах, усредняют опытные данные по теплоотдаче с точностью ± 10 и даже ± 15 %, что считается вполне приемлемым при отсутствии других возможностей. Поэтому получившаяся невязка примерно в 18 % не должна вызывать заключения о том, что экспериментальный результат неверен. Естественно величина k содержит в себе погрешности эксперимента, но они не могут превышать $\pm 5 \dots \pm 6$ %, что можно доказать, проведя анализ методических погрешностей.

Список литературы

- 1 Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М., 1981. 416 с.
- 2 Ляшков В.И. Теоретические основы теплотехники. М., 2005. 253 с.
- 3 Осипова В.А. Экспериментальные исследования процессов теплообмена. М., 1979. 392 с.
- 4 Краснощеков Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче. М., 1980. 228 с.