

Энгельсский технологический институт (филиал)
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.»

Кафедра «Технология и оборудование химических, нефтегазовых
и пищевых производств»

ТЕПЛОТДАЧА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЫ ПРИ СВОБОДНОМ ДВИЖЕНИИ ВОЗДУХА

Методические указания к выполнению лабораторной работы
по дисциплинам «Теплотехника»,
«Техническая термодинамика и теплотехника»

для студентов направлений
15.03.02 «Технологические машины и оборудование»
18.03.01 «Химическая технология»
21.03.01 «Нефтегазовое дело»

очной, заочной, очно-заочной форм обучения

Энгельс 2024 г.

Цель работы: углубление знаний по теории теплоотдачи при свободном движении газа (жидкости) в неограниченном пространстве, ознакомление с методикой экспериментального определения коэффициента теплоотдачи при свободном движении и получение необходимых навыков в проведении эксперимента и обработке опытных данных.

В результате работы должно быть усвоено:

- 1) физическая сущность процесса теплоотдачи и физический смысл коэффициента теплоотдачи;
- 2) содержание закона Ньютона-Рихмана и его применение при определении коэффициента теплоотдачи экспериментальным путем;
- 3) влияние температурного напора на коэффициент теплоотдачи;
- 4) обработка результатов опыта в обобщенном критериальном виде.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Процесс теплообмена между твердой поверхностью и средой (жидкостью, газом) называется теплоотдачей.

Различают свободное и вынужденное движение среды. Движение, возникающее в среде под действием внешних сил, называется вынужденным. Движение, возникающее в среде, находящейся в поле земного тяготения, с неоднородным распределением температур, называется свободным.

Теплота, воспринимаемая жидкостью (газом) от поверхности тела, переносится ею в окружающее пространство. По мере нагревания среда (жидкость, газ) становится легче и поднимается вверх, а на ее место поступает более холодная.

В соответствии с законом Ньютона-Рихмана количество переносимого тепла пропорционально поверхности тела и температурному напору, то есть разности температур поверхности t_w и окружающей среды t_f .

Теплоотдача при свободном движении жидкости зависит от режима ее движения около теплоотдающей (тепловоспринимающей) поверхности, определяемого температурным напором:

$$\Delta t = t_w - t_f .$$

При малых значениях Δt преобладает ламинарный режим движения, а большим значениям Δt соответствует турбулентный режим.

На развитие процесса теплообмена при свободном движении жидкости основное влияние оказывает протяженность поверхности, вдоль которой движется жидкость, и ее положение.

В данной работе необходимо установить влияние температурного напора на средний коэффициент теплоотдачи. Последний определяется из соотношения:

$$\bar{\alpha} = \frac{Q_k}{F \cdot (t_w - t_f)}, \quad (1)$$

где Q_k – количество теплоты, передаваемое воздуху за счет конвективной теплоотдачи, Вт;

F – поверхность исследуемого участка трубы, м²:

$$F = \pi \cdot d \cdot l,$$

где d – наружный диаметр трубы, м;

l – длина исследуемого участка трубы, м.

Согласно теории подобия, критериальное уравнение, описывающее конвективный теплообмен при свободном движении жидкости в неограниченном пространстве, имеет вид:

$$\overline{Nu}_{f,d} = c \cdot (Gr \cdot Pr)^n, \quad (2)$$

где Nu – критерий Нуссельта:

$$\overline{Nu}_{f,d} = \frac{\bar{\alpha} \cdot d}{\lambda_f},$$

Gr – критерий Грасгофа:

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot \Delta t \cdot d^3}{\nu_f^2},$$

Pr – критерий Прандтля:

$$Pr = \frac{\nu_f}{a_f},$$

λ_f – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·К);

ν_f – коэффициент кинематической вязкости, м²/с;

a_f – коэффициент температуропроводности, м²/с;

β – коэффициент объемного расширения, 1/К:

$$\beta = 1/(273 + t_f).$$

Для газов критерий Прандтля является практически величиной постоянной, не зависящей от температуры.

ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Установка для определения коэффициента теплоотдачи (рис. 1) состоит из металлической трубы I, внутри которой находится электрический нагреватель II.

Количество тепла, выделенное нагревателем и переданное через стенку трубы в окружающую среду при установившемся тепловом состоянии, определяется по затраченной электрической мощности. Последняя определяется по показаниям амперметра и вольтметра, установленных на стенде, причем падение напряжения измеряется только на среднем участке спирали для того, чтобы не учитывать влияние теплоотдачи с торцов трубы.

Изменение мощности, потребляемой электронагревателем, производится при помощи лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) (III), последовательно включенного в цепь нагревателя.

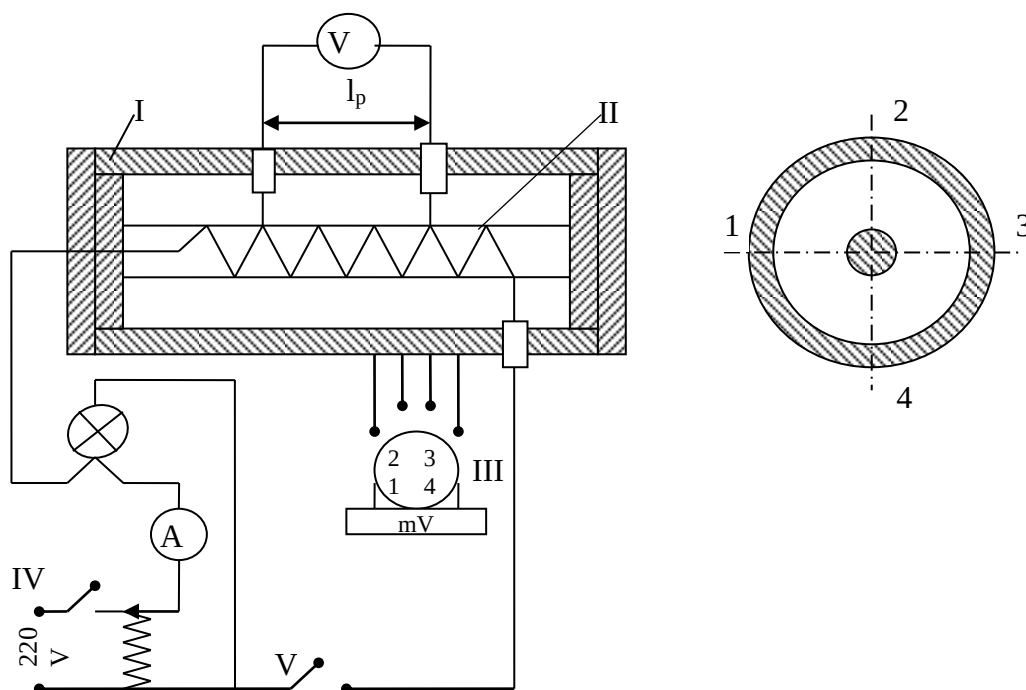


Рис.1. Схема установки для определения коэффициента теплоотдачи:

I - металлическая труба; II - электрический нагреватель;

III – лабораторный автотрансформатор; IV, V – переключатели.

Температура поверхности трубы I измеряется микропроцессорным измерителем типа 2ТРМ0 с термопарами, установленными в 4-х точках по ее периметру. Расчетное значение температуры поверхности трубы принимается как среднее арифметическое значение.

Переключение термопар производится переключателем IV.

Размеры трубы: диаметр $d = 0,0505$ м, длина $l = 0,056$ м.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Ознакомившись с описанием опытной установки, необходимо заготовить протокол испытаний по форме табл.1.

Включение и выключение, а также изменение величины силы тока производится под руководством преподавателя.

Таблица 1

Протокол записи показаний измерительных приборов

№ опыта	Показания вольтметра U, В	Величина силы тока I, А	Температура точек поверхности трубы $t_1, ^\circ\text{C}; t_2, ^\circ\text{C}; t_3, ^\circ\text{C}; t_4, ^\circ\text{C}$	Средняя температура поверхности трубы, $t_w, ^\circ\text{C}$	Температура окружающего воздуха $t_f, ^\circ\text{C}$

Все измерения проводятся при установившемся тепловом состоянии установки, которое характеризуется неизменностью показаний приборов во времени (3 замера).

Замеры производятся через каждые 5 минут. Опыт считается законченным после записей трех показаний приборов при стационарном режиме. Для выполнения работы в полном объеме необходимо провести опыты при трех различных температурах стенки трубы, то есть при величине силы тока, равной 1; 1,3 и 1,7 ампера.

При установившемся тепловом состоянии вся выделяющаяся в нагревателе тепловая энергия передается через поверхность трубы в окружающую среду. Эта передача происходит как путем теплопроводности, так и путем лучеиспускания.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

На основании полученных экспериментальных данных производится расчет в следующем порядке:

1. Количество теплоты, переданное от поверхности трубы к воздуху:

$$Q = I \cdot U. \quad (3)$$

2. Количество теплоты, переданное путем лучеиспускания:

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon \cdot c_0 \cdot F \cdot \left[\left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_f}{100} \right)^4 \right], \quad (4)$$

где $\varepsilon=0,8$ – степень черноты стенки трубы;

$c_0=5,77$ – коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела, Вт/(м²·К⁴);

T_w и T_f – абсолютные температуры поверхности трубы и окружающего воздуха, соответственно, К;

F – площадь поверхности теплообмена, м².

3. Количество теплоты, переданное от внешней поверхности трубы к воздуху конвекцией и теплопроводностью (конвективная теплоотдача):

$$Q_{\kappa} = Q - Q_{\lambda}. \quad (5)$$

4. Средний коэффициент теплоотдачи вычисляется по (1).

5. Результаты обработки экспериментальных данных представляются по форме табл. 2, после чего строится график функциональной зависимости.

Таблица 2

Протокол результатов вычислений

Полное количество теплоты Q	Количество теплоты, переданное конвекцией Q_{κ}	Количество теплоты, переданное лучеиспусканием Q_{λ}	Средний коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}$	Критерий Нуссельта $Nu_{f,d}$	Критерий Грасгофа $Gr_{f,d}$	$\lg Nu_{f,d}$	$\lg Gr_{f,d}$	c	n
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

6. Для распространения полученных результатов на другие подобные процессы необходимо расчетные данные обобщить и представить в виде критериального уравнения, которое описывает процесс конвективного теплообмена для случая свободного движения воздуха около трубы:

$$Nu_{f,d} = c \cdot (Gr \cdot Pr)_{f,d}^n. \quad (6)$$

Физические параметры воздуха λ_f , ν_f , α_f , входящие в критерии подобия, выбирают из Приложения по температуре окружающего воздуха.

Вычисление критериев подобия выполняется для каждого температурного режима, полученные результаты заносятся в табл. 2.

Для определения «с» и «n» прологарифмируем зависимость (6):

$$\lg Nu_{f,d} = \lg c + n \cdot \lg (Gr \cdot Pr)_{f,d}. \quad (7)$$

В логарифмической системе координат эта зависимость имеет вид прямой линии (рис.2).

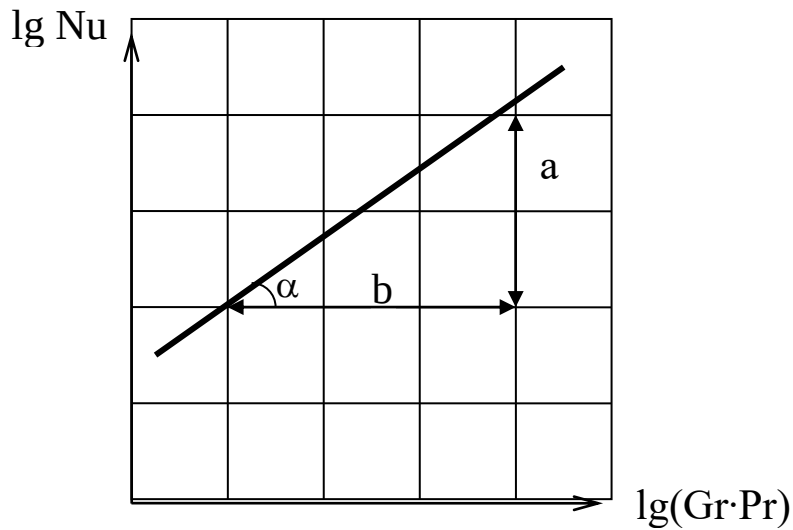


Рис.2. График зависимости $\lg Nu$ от $\lg(Gr \cdot Pr)$ для определения значения показателя степени n .

В связи с инерционностью процесса теплопередачи и большими затратами времени на эксперимент каждый опыт проводится один раз. Поэтому оценка погрешности производится по адаптационной теории [1]:

$$\delta \bar{\alpha} = \frac{\Delta \bar{\alpha}}{\bar{\alpha}} = \left| \frac{\Delta I}{I} \right| + \left| \frac{\Delta U}{U} \right| + \left| \frac{\Delta t_w + \Delta t_f}{t_w - t_f} \right| + \left| \frac{\Delta l}{l} \right| + \left| \frac{\Delta d}{d} \right|,$$

где Δ - абсолютные ошибки измерения величин.

Обозначим относительные ошибки, %, непосредственно измеряемых в опыте величин:

$$\delta I = \frac{\Delta I}{I} \cdot 100, \quad \delta U = \frac{\Delta U}{U} \cdot 100,$$

$$\delta(t_w - t_f) = \frac{\Delta t_w + \Delta t_f}{t_w - t_f} \cdot 100,$$

$$\delta l = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100, \quad \delta d = \frac{\Delta d}{d} \cdot 100,$$

и окончательно получим:

$$\delta \bar{\alpha} = |\delta I| + |\delta U| + |\delta l| + |\delta d| + |\delta(t_w - t_f)|. \quad (10)$$

В лабораторной работе установлены амперметр и вольтметр с классом точности 1,5. Температура поверхности трубы измеряется с помощью

микропроцессорного измерителя типа 2ТРМ0 с классом точности 0,5. Температура окружающего воздуха определяется по термометру с точностью 0,1°C. Ошибка в измерении диаметра d и длины трубы l с помощью металлической линейки составляет 1,0 мм.

Рассчитать по (10) максимально возможную математическую ошибку коэффициента теплоотдачи в процентах. Определить по той же зависимости максимально возможную суммарную ошибку, то есть сумму систематической и случайной ошибок.

ОТЧЕТ О РАБОТЕ

Отчет о работе должен содержать следующее:

- 1) краткое описание работы;
- 2) принципиальную схему установки;
- 3) протокол записи показаний измерительных приборов;
- 4) обработку и протокол результатов испытаний;
- 5) графики зависимости теплоотдачи от температурного напора и зависимости между критериями подобия;
- 6) расчет ошибки в определении α и сопоставление результатов опыта с литературными данными.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите основные случаи теплообмена.
2. Что называется конвективным теплообменом?
3. Процесс теплоотдачи и его определение.
4. Из каких тепловых процессов складывается процесс теплоотдачи?
5. Что называется свободным движением и от чего зависит его интенсивность?
6. Формулировка понятия «коэффициент теплоотдачи».
7. Факторы, влияющие на коэффициент теплоотдачи.
8. Динамический и тепловой пограничные слои, их физический смысл.
9. Каков механизм передачи тепла при ламинарном и турбулентном режимах движения среды (жидкость, газ)?
10. Формула для определения количества теплоты, переданной от поверхности трубы к воздуху.
11. Почему для определения коэффициента теплоотдачи применяют теорию подобия?
12. Условия подобия физических процессов.
13. Особенность теплоотдачи при свободном и вынужденном движении среды (жидкость, газ)?
14. Чем характеризуется установившийся режим в данной работе?
15. Закон, описывающий процесс теплового излучения.

Физические параметры сухого воздуха

t_f , °C	ρ , кг/м ³	$\lambda_f 10^2$, Вт/(м·°C)	$a_f \cdot 10^6$, м ² /с	$\mu_f 10^6$, Па·с	$\nu_f 10^6$, м ² /с	Pr
10	1,247	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	2,90	26,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684
160	0,815	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	3,93	51,4	26,0	34,85	0,680