

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**  
**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
**КАФЕДРА ФИЗИКИ**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

**к выполнению лабораторной работы**  
**ТМО-9**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ**  
**ОДИНОЧНОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБЫ**  
**ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ**  
**В НЕОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ**

УДК 621.1+62-69

В методических указаниях приведено описание лабораторной работы ТМО-9 "Определение коэффициента теплоотдачи одиночной вертикальной трубы при естественной конвекции в неограниченном пространстве". В работе коэффициент теплоотдачи при естественной конвекции для вертикальной трубы определяется опытным путем, а также находится по критериальному уравнению подобия.

Методические указания к лабораторной работе ТМО-9 предназначены для студентов всех технических специальностей и всех форм обучения в БрГТУ.

Составители: А.И. Пинчук, к.ф.-м.н., доцент  
В.Д. Аксельев, д.т.н., профессор  
Н.Ф. Клименко, инженер-электронщик

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ТМО-9

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ ОДИНОЧНОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБЫ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В НЕОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

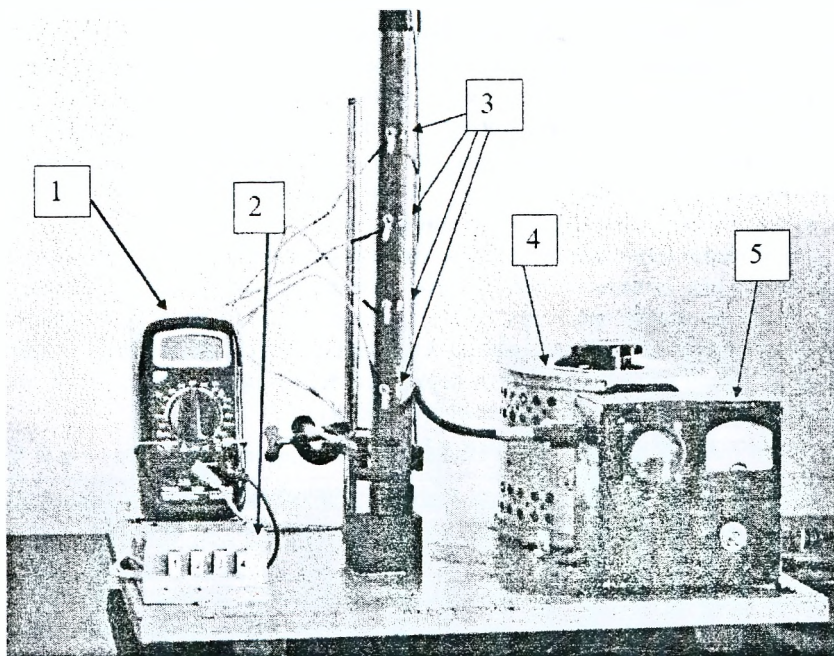
#### 1. Цель работы

Определение коэффициента теплоотдачи одиночной вертикальной трубы при естественной конвекции опытным путем и по критериальному уравнению подобия.

#### 2. Приборы принадлежности

Лабораторная установка, состоящая из стальной вертикальной трубы, измерительных приборов и источника питания.

#### 3. Описание лабораторной установки



Установка выполнена в виде вертикально расположенной дюралевой трубы паружным диаметром  $d = 30$  мм и длиной  $l = 220$  мм, внутри которой расположен электрический нагреватель. Для измерения значения температуры по

высоте вертикальной трубы используется мультиметр 1 (при этом переключатель мультиметра должен находиться напротив отметки "°C" на шкале режимов измерений). Переключение термодатчиков осуществляется с помощью переключателя 2 путем нажатия номера требуемой термодатчиковой пары (остальные переключатели должны быть отжаты). На дюралевого трубе указана нумерация горячих спаев термодатчиков, запаянных в стенку трубы, в порядке увеличения их порядкового номера. Блок питания 4 позволяет увеличивать электрическую мощность нагревателя внутри трубы путем вращения ручки регулятора по часовой стрелке вплоть до установленного ограничителя мощности. Измерительный блок 5 включает в себя амперметр и вольтметр и, соответственно, позволяет регистрировать значения силы тока  $I$  и падение напряжения  $U$  в цепи.

#### 4. Проведение измерений

Включите блок питания в сеть. Включите измерительный блок тумблером, который расположен на передней панели блока измерения. Установите мультиметр в соответствующий режим измерения (режим измерения температуры). Измерьте температуру окружающего воздуха с помощью термометра, установленного в лаборатории. Задайте по указанию преподавателя начальное значение напряжения и силы тока с помощью регулятора блока питания. Далее увеличивайте электрическую мощность нагревателя внутри трубы с интервалом значений напряжения, задаваемого преподавателем. Рекомендуемый диапазон значений падения напряжения в цепи – от нуля до 50 В. Температуру трубы измеряйте с интервалом 20 мин до наступления стационарного режима (когда показания мультиметра стабилизируются).

При включении электрического нагревателя внутри трубы в электрическую цепь в нем выделяется теплота, расходуемая на нагрев трубы и теплопотери. Через некоторое время вся теплота, выделяющаяся в нагревателе, расходуется на покрытие тепловых потерь в окружающую среду. Начиная с этого момента, температура наружной поверхности трубы не будет меняться, что указывает на установление стационарного режима.

Результаты измерений заносите в таблицу:

№ пп	Сила тока $I$ , А	Напряжение $U$ , В	Температура					
			окружающего воздуха $t_{ж}$ , °C	поверхности трубы $t_c$ , °C				
				№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	$t_c^{cp}$ , °C
1								
2								
...								
n								

## 5. Задания для самостоятельной работы

### Определение коэффициентов теплоотдачи опытным путем

При стационарном режиме вся теплота, получаемая от электрического нагревателя, выделяется внутри трубы, а также расходуется на теплопотери в окружающую среду, т.е.

$$N = UI = Q, \quad (5.1)$$

где  $Q$  – тепловой поток от поверхности тела (в данном случае, трубы) к поверхности жидкости (окружающего воздуха). Под термином "жидкость" подразумевается любая сплошная среда, обладающая свойством текучести.

Величина  $Q$  может быть найдена как

$$Q = Q_k + Q_l; \quad (5.2)$$

$$Q_k = \alpha_k (T_c - T_{ж}) F; \quad (5.3)$$

$$Q_l = \alpha_l (T_c - T_{ж}) F; \quad (5.4)$$

где  $\alpha_k$  и  $\alpha_l$  – коэффициенты конвективной теплоотдачи и теплоотдачи излучением соответственно, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_c$  – температура поверхности тела. К;  $T_{ж}$  – температура поверхностей окружающих тел, принимаемая равной температуре окружающей среды, К;  $F$  – поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>. Формулы (5.3) и (5.4) выражают закон Ньютона-Рихмана.

Общий коэффициент теплоотдачи можно определить из соотношения:

$$\alpha = \frac{Q}{(T_c - T_{ж}) F} = \frac{N}{(T_c - T_{ж}) F} = \frac{UI}{(T_c - T_{ж}) F}. \quad (5.5)$$

Коэффициент теплоотдачи излучением находим из формулы:

$$\alpha_l = \varphi_{1,2} \frac{\varepsilon_{пр} C_0 \left[ \left( \frac{T_c}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{ж}}{100} \right)^4 \right]}{T_c - T_{ж}}, \quad (5.6)$$

где  $\varphi_{1,2}$  – угловой коэффициент поглощения (учитывает часть излучения первого тела, которое воспринимается другим телом);  $\varepsilon_{пр}$  – приведенная степень черноты системы тел;  $C_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела,  $C_0 = 5.67$  Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>.

Определение  $\alpha_k$  возможно следующим образом. Из формулы (5.5) рассчитывается общий коэффициент теплоотдачи. Коэффициент теплоотдачи излучением находится по формуле (5.6). Коэффициент конвективной теплоотдачи находится как разность этих двух коэффициентов:

$$\alpha_k = \alpha - \alpha_l. \quad (5.7)$$

Угловой коэффициент излучения принимаем равным единице 1,0, поскольку излучение от поверхности трубы полностью воспринимается окружающими телами. На основании того, что площадь поверхности трубы значительно меньше площади поверхностей окружающих тел, приведенную степень черноты системы принимаем равной  $\varepsilon_{пр} = 0.048$  (степени черноты для полированного алюминия, см. Табл. П1). Поверхность теплоотдачи находим как площадь боковой поверхности цилиндра. Полученные данные расчета занесите в таблицу:

Мощность нагревателя $N = UI, \text{ Вт}$	Поверхность теплоотдачи $F, \text{ м}^2$	Коэффициенты теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$		
		$\alpha$	$\alpha_{л}$	$\alpha_{к}$

### Определение коэффициента конвективного теплообмена по критериальному уравнению подобия

Аналитическое определение  $\alpha_{к}$  представляет собой сложную задачу, поскольку в этом случае необходимо решить систему дифференциальных уравнений. Поэтому для расчета используют критериальные уравнения подобия. Числа подобия позволяют анализировать подобные явления, имея экспериментальные данные лишь по какому-либо одному из подобных явлений. Кроме того, они позволяют сократить число неизвестных переменных. Из теории подобия следует, что сложные процессы характеризуются не отдельными физическими величинами, а определенным образом составленными из них безразмерными комплексами или критериями. Если на основе теории подобия объединить физические и геометрические параметры в безразмерные комплексы (критерии подобия), то процесс теплообмена в условиях естественной конвекции можно описать следующими тремя числами.

*Число Нуссельта:*

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}, \quad (5.8)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $l$  – характерный размер твердого тела;  $\lambda$  – теплопроводность жидкости или газа,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ . Число Нуссельта является безразмерным коэффициентом теплоотдачи.

*Число Грасгофа:*

$$Gr = \frac{g\beta(T_c - T_{ж})l^3}{\nu^2}, \quad (5.9)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения жидкости, который для идеальных газов равен  $\beta = 1/T$ ,  $\text{К}$ ;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ , которая обусловлена силами внутреннего трения. Число Грасгофа характеризует соотношение между подъемной силой и силой вязкого трения.

*Число Прандтля:*

$$Pr = \nu/a, \quad (5.10)$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ . Число Прандтля определяет физические свойства жидкости.

Для аналитического определения  $\alpha_k$  выполните следующие действия:

- находим характерную температуру  $t_m = 0.5(t_c + t_k)$ ;
- по этой температуре выбираем теплофизические характеристики жидкости (из Табл. П2): коэффициент вязкости  $\nu$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , а также число Прандтля  $Pr$ ;
- рассчитываем коэффициент объемного расширения  $\beta$  (для газа  $\beta=1/T$ );
- используя теплофизические характеристики воздуха, рассчитываем число Грасгофа по формуле (5.9); где характерным размером является высота трубы  $l$ ;
- находим число Релея из соотношения

$$Ra = GrPr; \quad (5.11)$$

- рассчитываем число Нуссельта из формулы

$$Nu = c(Ra)^n, \quad (5.12)$$

где  $c$  и  $n$  – коэффициенты, зависящие от числа Рэлея. Их определяем из таблицы, показанной ниже:

### Значения коэффициентов $c$ и $n$

Число Релея	$c$	$n$
$1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^2$	1,18	1/8
$5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4
$2 \cdot 10^7 - 1 \cdot 10^{13}$	0,135	1/3

- наконец, находим коэффициент теплоотдачи  $\alpha_k$  из соотношения

$$\alpha_k = \frac{Nu\lambda}{l}. \quad (5.13)$$

### Дополнительное задание

По формулам (5.2), (5.3) и (5.4) рассчитайте величину тепловых потоков  $Q_n$ ,  $Q_k$  и  $Q$ .

### Контрольные вопросы

1. Закон Ньютона-Рихмана.
2. Какие существуют способы переноса теплоты?
3. Естественная и вынужденная конвекция.
4. Угловые коэффициенты при теплообмене излучением.
5. Какие температуры и геометрические размеры тела принимаются за определяющие при расчете коэффициента теплоотдачи?
6. Что представляют собой числа подобия и критериальные уравнения?
7. Физическая сущность чисел Нуссельта, Грасгофа, Релея и Прандтля.

Таблица П1

Степень черноты полного нормального излучения материала

№ пп	Наименование материала	t, °C	ε
1	Алюминий: шероховатый окисленный полированный	20...50	0,033
		- " -	0,15
		- " -	0,048
2	Алюминиевая краска	50	0,5
3	Асбестовый картон	20	0,96
4	Асбоцифер	20	0,96
5	Бетон	20	0,8
6	Вода (слой толщиной 0,1 мм и более)	50	0,93
7	Железо литее необработанное		0,91
8	Кирпич красный шероховатый	20	0,88...0,93
9	Кирпич огнеупорный	500...1000	0,65...0,75
10	Кирпич шамотный	20	0,85
11	Литунь: окисленная полированная прокатанная		0,6
			0,03
			0,20
			0,94
12	Масляная краска		0,94
13	Медь: окисленная полированная		0,62
			0,02
14	Никель окисленный		0,4
15	Нихромовая проволока		0,96
16	Серебро полированное		0,02
17	Сталь: окисленная окисленная шероховатая полированная ржавая красная	80	0,80
		750...1030	0,95
		20	0,52...0,56
		20	0,69
18	Снег		0,96
19	Стекло	20...100	0,94...0,91
		250...1000	0,87...0,72
		1100...1500	0,7...0,67
20	Таль	20	0,91...0,93
21	Хром	20	0,17
22	Чугун: обточенный шероховатый окисленный		0,65
			0,96
23	Шлак котельный	0...100	0,97...0,93
		200...500	0,89...0,78
		600...1200	0,76...0,70
		1400...1800	0,69...0,67



Таблица П2 – Физические свойства сухого воздуха при давлении 760 мм рт. ст.

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C_p, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\lambda \cdot 10^2, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\alpha \cdot 10^6, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Pr
-50	1,584	1,013	2,04	12,7	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	13,8	15,2	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	14,9	15,7	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	12,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	61,0	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	71,6	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33,0	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,3	39,1	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	163,4	41,8	115,4	0,706
800	0,329	1,155	7,18	188,8	44,3	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	216,2	46,7	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	245,9	49,0	177,1	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	276,2	51,2	199,3	0,722
1200	0,239	1,210	9,15	316,5	53,5	233,7	0,724

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

*Составители:*

*Пинчук Александр Иванович  
Акельев Валерий Дмитриевич  
Клименко Николай Фёдорович*

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторной работы  
**ТМО-9**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ ОДИНОЧНОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБЫ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В НЕОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ**

Ответственный за выпуск: Пинчук А.И.

Редактор: Боровикова Е.А.

Компьютерная вёрстка: Соколюк А.П.

Корректор: Никитчик Е.В.

---

Подписано к печати 29.05.2014 г. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Гарнитура Times New Roman.  
Бумага Performer. Усл. п. л. 0,7. Уч. изд. 0,75. Заказ № 430. Тираж 50 экз.  
Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный  
технический университет», 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.