

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Ивановский государственный энергетический  
университет имени В.И. Ленина»

Кафедра теоретических основ теплотехники

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ  
ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ДВИЖЕНИИ ВОЗДУХА  
В ТРУБЕ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Методические указания к выполнению лабораторной работы

Иваново 2014

Составители: В.В. БУХМИРОВ

Д.В. РАКУТИНА

Редактор Т.Е. СОЗИНОВА

Методические указания содержат описание экспериментальной установки, методику проведения эксперимента, а также математический аппарат, необходимый для обработки результатов опыта. В заключение приведены контрольные вопросы по теме исследования.

Методические указания предназначены для студентов дневного и заочного факультетов, обучающихся по направлениям 140100 «Теплотехника и теплоэнергетика», 141100 «Энергетическое машиностроение», 140700 «Ядерная энергетика и теплофизика».

Методические указания утверждены цикловой методической комиссией ТЭФ

Рецензент

кафедра теоретических основ теплотехники ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

## 1. Задание

1. Экспериментально определить средний по длине трубы коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности трубы к воздуху при разных скоростях его движения.
2. Получить критериальное уравнение вида  $Nu = C \cdot Re^n$ .
3. Сравнить значения опытного коэффициента теплоотдачи с коэффициентом теплоотдачи, рассчитанным по известным критериальным формулам.
4. Сделать выводы по работе.

## 2. Краткие сведения из теории конвективного теплообмена [1]

Тепловой поток  $Q$ , передаваемый от внутренней поверхности трубы к воздуху, в инженерных расчетах находят по закону теплоотдачи:

$$Q = \alpha \cdot (T_w - T_f) \cdot F, \quad (1)$$

где  $Q$  – тепловой поток, Вт;  $T_w$  – температура внутренней стенки трубы, °С (К);  $T_f$  – средняя температура воздуха в трубе, °С (К);  $F$  – площадь поверхности теплообмена (площадь внутренней поверхности трубы), м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – средний коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

При заданных геометрических размерах системы теплообмена, температурах стенки и текучей среды задача расчета теплового потока сводится к определению коэффициента теплоотдачи ( $\alpha$ ). Заметим, что коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  не имеет физического смысла и выступает в роли коэффициента пропорциональности в законе теплоотдачи Ньютона. Из анализа закона Ньютона следует, что  $\alpha$  численно равен тепловому потоку с 1 м<sup>2</sup> поверхности теплообмена при разности температур между стенкой и текучей средой в 1°С (К).

Коэффициент теплоотдачи находят, используя закон Ньютона, экспериментально определив тепловой поток и разность температур  $\Delta T = T_w - T_f$  :

$$\alpha = \frac{Q}{\Delta T \cdot F}. \quad (2)$$

Результаты экспериментов по определению коэффициента теплоотдачи обрабатывают в виде критериальных уравнений подобия, которые имеют вид:

— свободная конвекция

$$Nu = f(Ra); \quad (3)$$

— вынужденная конвекция (ламинарный режим течения)

$$Nu = f(Gr, Re, Pr); \quad (4)$$

— вынужденная конвекция (переходный и турбулентный режимы течения)

$$Nu = f(Re, Pr), \quad (5)$$

где  $Nu, Gr, Re, Pr, Ra$  – критерии подобия.

*Критерий подобия* – безразмерный комплекс, составленный из физических величин, который *характеризует* отношение физических эффектов.

Все критерии можно разделить на две основные группы: *определяемые* и *определяющие*. Критерии, содержащие неизвестные (искомые) величины называют *определяемыми*. Критерии подобия, составленные из физических величин, заданных условиями однозначности, называют *определяющими*. Определяемые критерии получают, используя результаты эксперимента. В уравнениях подобия (3) – (5) определяемым является критерий Нуссельта ( $Nu$ ), а определяющими критериями – критерий Грасгофа ( $Gr$ ), критерий Рэйнольдса ( $Re$ ), критерий Прандтля ( $Pr$ ) и критерий Рэля ( $Ra$ ).

Критерий Нуссельта (Нуссельт) характеризует отношение теплового потока конвективной теплоотдачей к кондуктивно-

му тепловому потоку в пограничном слое текучей среды вблизи стенки:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot R_0}{\lambda}, \quad (6)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $R_0$  – определяющий или характерный размер, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности текучей среды, Вт/(м·К).

Критерий Грасгофа (Грасгоф) характеризует отношение термогравитационной силы к силе вязкого трения:

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot R_0^3}{\nu^2} \beta \cdot \Delta T, \quad (7)$$

где  $g = 9,8 \text{ м}^2/\text{с}$  – ускорение свободного падения;  $\Delta T = |T_f - T_w|$  – модуль разности температур между стенкой и флюидом, °С (К);  $\beta$  – коэффициент объемного расширения флюида, 1/К.

Коэффициент объемного расширения для капельных жидкостей приведен в справочниках [2, 4] в зависимости от температуры флюида, а для газов его рассчитывают по формуле:

$$\beta = \frac{1}{T_0}, \quad (8)$$

где  $T_0$  – определяющая температура в Кельвинах.

Критерий Рэйнольдса (Рэйнольдс) – критерий динамического подобия, который характеризует отношение силы инерции к силе вязкого трения:

$$\text{Re} = \frac{w_0 \cdot R_0}{\nu}, \quad (9)$$

где  $w_0$  – определяющая или характерная скорость, м/с;  $R_0$  – определяющий или характерный размер, м;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости текучей среды, м<sup>2</sup>/с. По значению критерия  $\text{Re}$  судят о режиме течения флюида при вынужденной конвекции.

Критерий Прандтля (Прандтль) представляет собой отношение двух характеристик молекулярного переноса импульса ( $\nu$ ) к переносу теплоты ( $a$ ) и является физическим параметром среды, значение которого приводят в справочниках [2, 4] в зависимости от температуры:

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \quad (10)$$

где  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости текучей среды,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $a$  – коэффициент температуропроводности флюида,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Критерий Рэлея (Рэлей) находят по формуле

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g \cdot R_0^3}{\nu^2} \beta \cdot \Delta T \cdot Pr. \quad (11)$$

Физические свойства текучей среды ( $\lambda$ ,  $\nu$ ,  $a$ ,  $\beta$ ), входящие в критерии подобия, находят в справочных таблицах по определяющей или характерной температуре ( $T_0$ ), которая наиболее точно учитывает влияние температурного поля текучей среды на эти свойства. Определяющую температуру необходимо принимать в соответствии с указаниями автора критериальной формулы.

В качестве определяющего размера ( $R_0$ ) выбирают размер, который оказывает наибольшее влияние на процесс теплоотдачи. Например, при расчете теплоотдачи в трубах и каналах за определяющий размер принимают внутренний диаметр трубы  $R_0 = d_{\text{вн}}$ .

Определяющую скорость флюида находят из уравнения неразрывности

$$w_0 = G / (\rho \cdot f), \quad (12)$$

где  $G$  – расход флюида,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  $\rho$  – плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $f$  – площадь поперечного сечения для прохода флюида,  $\text{м}^2$ .

Конкретный вид функциональной зависимости в уравнениях подобия (3) – (5) принимает разработчик формулы. В принципе, для аппроксимации экспериментальных данных можно использовать любую полиномиальную зависимость. В отечественной литературе, как правило, в качестве аппроксимирующих уравнений применяют степенные функции вида:  
 — вынужденная конвекция ламинарный режим течения (вязкостно-гравитационный)

$$\overline{\text{Nu}} = C \cdot \text{Gr}^k \cdot \text{Re}^n \cdot \text{Pr}^m \cdot \varepsilon_t \cdot \overline{\varepsilon_\ell}; \quad (13)$$

— вынужденная конвекция переходный и турбулентный режимы течения

$$\overline{\text{Nu}} = C \cdot \text{Re}^n \cdot \text{Pr}^m \cdot \varepsilon_t \cdot \overline{\varepsilon_\ell}, \quad (14)$$

где  $C$ ,  $n$ ,  $m$ ,  $k$  – эмпирические коэффициенты, которые находят путем статистической обработки экспериментальных данных по методу наименьших квадратов;  $\varepsilon_t$  – поправка, учитывающая зависимость физических свойств флюида от температуры;  $\overline{\varepsilon_\ell} = f(\ell / d)$  – поправка, учитывающая влияние начального участка гидродинамической и тепловой стабилизации потока.

Для расчета поправочного коэффициента  $\varepsilon_t$  академик М.А. Михеев предложил формулу:

$$\varepsilon_t = \left( \frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_w} \right)^{0,25}, \quad (15)$$

где  $\text{Pr}_f$  – критерий Прандтля, который находят по таблицам физических свойств флюида при определяющей температуре;  $\text{Pr}_w$  – критерий Прандтля, который находят по таблицам физических свойств флюида при температуре стенки.

Основные критериальные формулы для расчета коэффициента теплоотдачи при движении флюида в круглой трубе приведены в справочнике [2].

В зависимости от значения критерия Рейнольдса в трубах и каналах существует ламинарный ( $Re_{f,d} \leq 2300$ ), турбулентный ( $Re_{f,d} > 10^4$ ) и переходный ( $2300 < Re_{f,d} \leq 10^4$ ) от ламинарного к турбулентному режимы течения.

Определяющие параметры для расчета критерия Рейнольдса:  $T_0 = \bar{T}_f = 0,5 \cdot (T_{f,вх} + T_{f,вых})$  – средняя температура флюида в трубе;  $R_0 = d_{вн}$  – внутренний диаметр трубы;  $w_0 = G / (\rho \cdot f)$  – средняя по сечению трубы скорость движения флюида.

*Теплоотдача при ламинарном режиме течения в трубе*  
( $Re_{f,d} \leq 2300$ )

При ламинарном режиме движения в прямых гладких трубах и наличии участков гидродинамической и тепловой стабилизации для более точной аппроксимации экспериментальных данных выделяют два подрежима: ламинарный вязкостный и ламинарный вязкостно-гравитационный. Ламинарный вязкостный режим течения имеет место при числах Рэлея  $Ra < 8 \cdot 10^5$ , а ламинарный вязкостно-гравитационный режим при числах Рэлея  $Ra \geq 8 \cdot 10^5$ . При этом определяющие параметры для расчета критерия Рэлея находят по формулам:  $T_0 = 0,5 \cdot (T_w + \bar{T}_f)$ , где  $\bar{T}_f = 0,5 \cdot (T_{f,вх} + T_{f,вых})$ ;  $R_0 = d_{вн}$ .

*Ламинарный вязкостный режим течения в трубе*  
( $Re_{f,d} \leq 2300$ ;  $Ra < 8 \cdot 10^5$ )

Средний по внутренней поверхности трубы длиной  $\ell$  коэффициент теплоотдачи рассчитывают по формуле Б.Г. Петухова, которая получена при  $\ell / (Pe \cdot d) \leq 0,05$  и  $0,07 \leq \mu_w / \mu_f \leq 1500$

$$\overline{Nu} = 1,55 \cdot (Pe \cdot d_{вн} / \ell)^{1/3} \cdot (\mu_f / \mu_w)^{0,14} \cdot \bar{\varepsilon}_\ell. \quad (16)$$

Определяющие параметры в формуле (16)  
 $T_0 = 0,5 \cdot (T_w + \bar{T}_f)$ , где  $\bar{T}_f = 0,5 \cdot (T_{f,вх} + T_{f,вых})$ ;  
 $R_0 = d_{вн}$ ;  $w_0 = G / (\rho \cdot f)$ .

Значение  $\mu_w$  выбирают для флюида при температуре стенки  $T_w$ .

Поправку  $\bar{\varepsilon}_\ell$  определяют по формулам  
 при  $\ell / (Re_{f,d} \cdot d) < 0,1$

$$\bar{\varepsilon}_\ell = 0,6 \cdot [\ell / (Re_{f,d} \cdot d_{вн})]^{-1/7} \cdot [1 + 2,5 \cdot \ell / (Re_{f,d} \cdot d_{вн})]; \quad (17)$$

при  $\ell / (Re_{f,d} \cdot d_{вн}) \geq 0,1$

$$\bar{\varepsilon}_\ell \approx 1, \quad (18)$$

где  $\ell$  – длина трубы.

*Ламинарный вязкостно-гравитационный режим течения  
 в трубе ( $Re_{f,d} \leq 2300$ ;  $Ra \geq 8 \cdot 10^5$ )*

Средний коэффициент теплоотдачи при ламинарном вязкостно-гравитационном режиме течения рассчитывают по критериальному уравнению М. А. Михеева

$$\bar{Nu}_{f,d} = 0,15 \cdot Re_{f,d}^{0,33} \cdot Pr_f^{0,33} \cdot (Gr_{f,d} \cdot Pr_f)^{0,1} \cdot \varepsilon_t \cdot \bar{\varepsilon}_\ell. \quad (19)$$

Определяющие параметры в формуле (19)  
 $T_0 = \bar{T}_f = 0,5 \cdot (T_{f,вх} + T_{f,вых})$ ;  $R_0 = d_{вн}$ ;  $w_0 = G / (\rho \cdot f)$ .

Поправку  $\varepsilon_t$  рассчитывают по формуле (15), а поправку  $\bar{\varepsilon}_\ell$  при  $\ell / d_{вн} < 50$  находят по данным табл. 1, при  $\ell / d_{вн} \geq 50$   $\bar{\varepsilon}_\ell = 1$ .

Таблица 1

Значение  $\bar{\varepsilon}_\ell$  при вязкостно-гравитационном режиме течения

$\ell/d$	1	2	5	10	15	20	30	40	50
$\bar{\varepsilon}_\ell$	1,9	1,7	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1,0

*Теплоотдача при турбулентном режиме течения в трубе*  
( $Re_{f,d} \geq 10^4$ )

Средний коэффициент теплоотдачи при турбулентном течении флюида в прямых гладких трубах рассчитывают по формуле М. А. Михеева

$$\overline{Nu}_{f,d} = 0,021 \cdot Re_{f,d}^{0,8} \cdot Pr_f^{0,43} \cdot \varepsilon_t \cdot \overline{\varepsilon}_\ell . \quad (20)$$

Поправку  $\varepsilon_t$  рассчитывают по формуле (15), а поправку  $\overline{\varepsilon}_\ell$  при  $\ell/d_{\text{вн}} < 50$  находят по формуле  $\overline{\varepsilon}_\ell \approx 1 + 2d_{\text{вн}}/\ell$ ; при  $\ell/d_{\text{вн}} > 50$   $\overline{\varepsilon}_\ell = 1$ .

Определяющие параметры в формуле (20)

$$T_0 = \overline{T}_f = 0,5 \cdot (T_{f,\text{вх}} + T_{f,\text{вых}}); R_0 = d_{\text{вн}}; w_0 = G / (\rho \cdot f).$$

*Теплоотдача при переходном режиме течения в трубе*  
( $2300 < Re_{f,d} < 10^4$ )

Переходный режим течения характеризуется перемежаемостью ламинарного и турбулентного течений. В этом случае коэффициент теплоотдачи рассчитывают по формуле

$$\overline{Nu}_{f,d} = K_0 \cdot Pr_{f,d}^{0,43} \cdot \varepsilon_t \cdot \overline{\varepsilon}_\ell , \quad (21)$$

где комплекс  $K_0$  находят по табл. 2 в зависимости от числа Рейнольдса, поправку  $\varepsilon_t$  – по формуле (15), а поправку  $\overline{\varepsilon}_\ell$  рассчитывают также как при турбулентном режиме течения флюида.

Определяющие параметры в формуле (21)

$$T_0 = \overline{T}_f = 0,5 \cdot (T_{f,\text{вх}} + T_{f,\text{вых}}); R_0 = d_{\text{вн}}; w_0 = G / (\rho \cdot f).$$

Таблица 2

Зависимость комплекса  $K_0$  от числа Рейнольдса

$Re \cdot 10^{-3}$	2,3	2,5	3,0	3,5	4,0	5	6	7	8	9	10
$K_0$	3,6	4,9	7,5	10	12,2	16,5	20	24	27	30	33

*Замечание.* Для газов температурная поправка  $\varepsilon_t = (Pr_f / Pr_w)^{0,25} \approx 1$  и  $Pr_f \approx 0,7 \div 1,0$ . Поэтому формулы (19), (20) и (21) можно записать в следующем виде:

$$\text{ламинарный режим} \quad \overline{Nu}_{f,d} = 0,146 \cdot Re_{f,d}^{0,33} \cdot Gr_{f,d}^{0,1}; \quad (22)$$

$$\text{турбулентный режим} \quad \overline{Nu}_{f,d} = 0,018 \cdot Re_{f,d}^{0,8}; \quad (23)$$

$$\text{переходный режим} \quad \overline{Nu}_{f,d} = 0,86 \cdot K_0. \quad (24)$$

*Теплоотдача при свободной конвекции  
около горизонтальных труб*

Средний коэффициент теплоотдачи при ламинарном режиме течения ( $Ra_{f,d} = 10^3 \div 10^8$ ) около горизонтальной трубы можно рассчитать по критериальной формуле И.М. Михеевой

$$\overline{Nu}_{f,d} = 0,5 \cdot Ra_{f,d}^{0,25} \cdot \varepsilon_t \quad (25)$$

Определяющие параметры в формуле (25)

$T_0 = \overline{T}_f$ ;  $R_0 = d_{нар}$  – наружный диаметр трубы.

Поправку  $\varepsilon_t$  рассчитывают по формуле (15).

### 3. Экспериментальная установка

Рабочий участок установки (рис.1) представляет собой трубу (1) из нержавеющей стали с внутренним диаметром  $d_{\text{вн}} = 8,5$  мм, наружным диаметром  $d_{\text{нар}} = 14,5$  мм и длиной  $\ell = 720$  мм. Степень черноты наружной поверхности трубы равна  $\epsilon_w = 0,2$ . Коэффициент теплопроводности материала трубы  $\lambda = 50$  Вт/(м·К).

В стенке трубы расположен нагревательный элемент с электрическим сопротивлением  $R_{\text{эл}} = 0,0344$  Ом. Включение электрического нагревателя производится тумблером (2). Напряжение на нагревателе регулируется автотрансформатором (3), а падение напряжения измеряется цифровым вольтметром (4).

Движение воздуха в трубе осуществляется при помощи воздушного насоса (5). Мощность насоса, а следовательно, и расход воздуха можно регулировать, изменяя напряжение на выходе лабораторного автотрансформатора (6). Включение воздушного насоса производится тумблером (7). Для измерения скорости и расхода воздуха в выходной части трубы установлена трубка Пито (8). Перепад давления (динамический напор)  $\Delta H$ , измеряемый трубкой Пито, регистрируется цифровым индикатором (9).

Для измерения температуры внутренней поверхности трубы на этой поверхности установлены десять термопар ( $T_1 - T_{10}$ ). Температура воздуха на входе и выходе из трубы измеряется термопарами  $T_{11}$  и  $T_{12}$  соответственно.

Падение давления на рабочем участке за счет гидравлического сопротивления трубы  $\Delta p$  регистрируется цифровым индикатором (10).

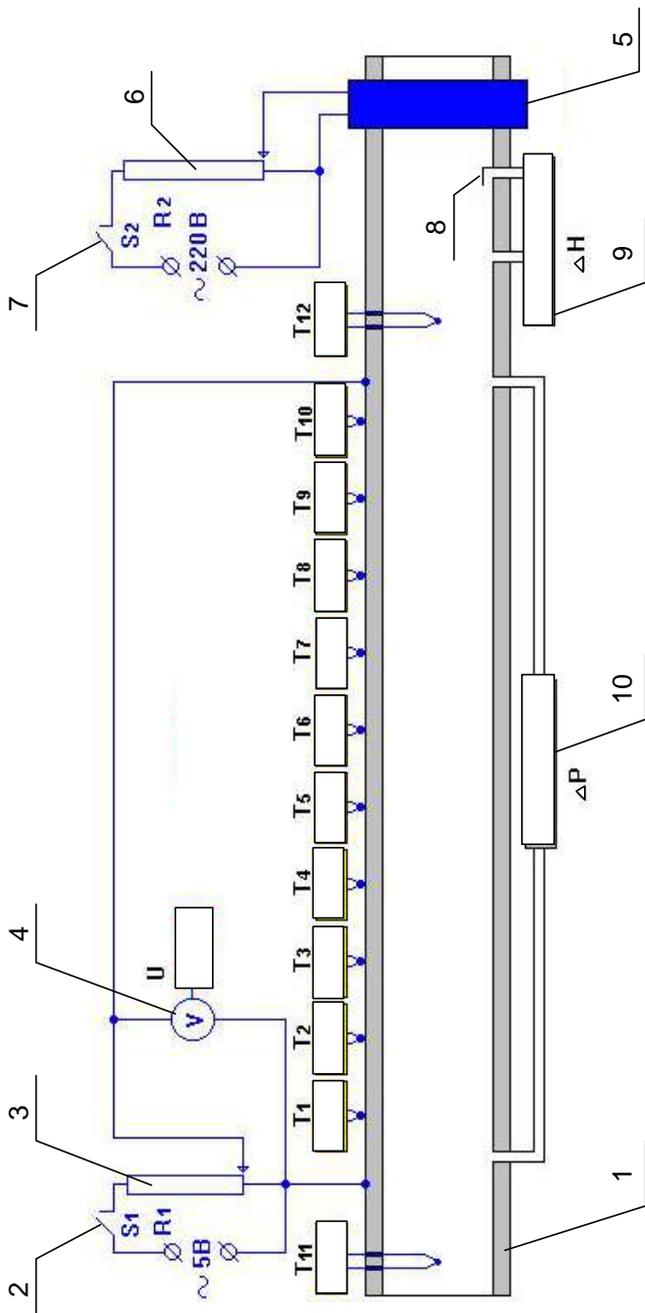


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – труба; 2 – тумблер включения электронагревателя;

3 – автотрансформатор нагревателя; 4 – вольтметр; 5 – воздушный насос; 6 – автотрансформатор насоса;

7 – тумблер включения насоса; 8 – трубка Пито; 9 – цифровой индикатор перепада давления на трубке Пито;

10 – цифровой индикатор перепада давления на рабочем участке; T<sub>1</sub>-T<sub>12</sub> – термомпары

#### 4. Порядок проведения эксперимента

1. Изучить устройство экспериментальной установки и подготовить журнал наблюдений. О готовности к проведению эксперимента сообщить преподавателю.

2. На компьютере запустить программу TP\_005.exe. При этом на экране монитора отобразится схема рабочего участка экспериментальной установки (рис. 1).

3. Включить тумблеры электропитания нагревателя (2) и воздушного насоса (7).

4. Автотрансформатором (6) установить заданный преподавателем перепад давления на трубке Пито  $\Delta H$  в диапазоне от 200 до 1600 Па.

5. Автотрансформатором (3) установить заданное преподавателем значение напряжения на нагревателе  $U$  в диапазоне от 1 до 2 В.

6. В заданном режиме зафиксировать значение температуры на всех термопарах ( $T_1-T_{12}$ ) и падение давления на рабочем участке  $\Delta p$ .

7. По указанию преподавателя установить другой расход воздуха в трубе, изменяя перепад давления на трубке Пито при помощи автотрансформатора (6).

8. Эксперименты проводят при барометрическом давлении  $B = 750$  мм рт ст и температуре воздуха в помещении  $T_B = 22$  °С.

Таблица 3

Журнал наблюдений

№ п/п	U	$\Delta H$	$\Delta p$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$	$T_8$	$T_9$	$T_{10}$	$T_{11}$	$T_{12}$
	В	Па	Па	°С	°С	°С									
1															
2															
⋮															
N															

9. При неизменной мощности на нагревателе и новом расходе воздуха зафиксировать в журнале наблюдений значения температур и падения давления на рабочем участке.

10. Опыты с разным расходом воздуха выполняют 2 – 6 раз (по указанию преподавателя).

11. Об окончании опытов сообщить преподавателю и подписать у него журнал наблюдений.

## 5. Обработка результатов эксперимента

1. Определить тепловой поток  $Q$ , Вт,

$$Q = \frac{U^2}{R_{эл}}, \quad (26)$$

где  $R_{эл}$  – электрическое сопротивление рабочего участка, Ом;  
 $U$  – напряжение на нагревателе, В.

2. Рассчитать среднюю температуру воздуха в трубе по формуле

$$T_0 = \bar{T}_f = 0,5 \cdot (T_{f,вх} + T_{f,вых}) = 0,5 \cdot (T_{11} + T_{12}), \quad (27)$$

где  $T_{f,вх} = T_{11}$  – температура воздуха на входе в трубу, °С;  
 $T_{f,вых} = T_{12}$  – температура воздуха на выходе из трубы, °С.

3. Рассчитать среднюю температуру внутренней поверхности стенки, °С

$$\bar{T}_w = \sum_{i=1}^{10} T_i / 10, \quad (28)$$

где  $T_i$  – температура на поверхности трубы, измеренная датчиками  $T_1$ –  $T_{10}$ , °С.

4. Найти массовый расход воздуха  $G$ , кг/с по формуле

$$G = \mu \frac{\pi d_{вн}^2}{4} \sqrt{2 \cdot \rho_{вых} \cdot \Delta H}, \quad (29)$$

где  $\mu = 0,63$  – коэффициент, полученный тарировкой трубки Пито;  $d_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр трубки, м;  $\Delta H$  – динамический напор, измеренный трубкой Пито, Па;  $\rho_{\text{вых}}$  – плотность воздуха на выходе,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Плотность воздуха на выходе рассчитывают по формуле

$$\rho_{\text{вых}} = \frac{B - \Delta p}{R(\bar{T}_f + 273,15)}, \quad (30)$$

где  $B$  – барометрическое давление, Па;  $\Delta p$  – падение давления на рабочем участке, Па;  $R = 287 \text{ Дж}/(\text{кг К})$  – газовая постоянная воздуха.

5. Рассчитать среднюю плотность воздуха в помещении

$$\rho = \frac{B}{R(\bar{T}_f + 273,15)}. \quad (31)$$

6. Определить среднюю скорость воздуха в трубе по уравнению неразрывности

$$w_o = \frac{G}{\rho \cdot f}, \quad (32)$$

где  $f = \frac{\pi \cdot d_{\text{вн}}^2}{4}$  – площадь поперечного сечения трубы,  $\text{м}^2$ .

7. Рассчитать коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности трубы к окружающему воздуху

$$\alpha_2 = \alpha_{\text{конв}} + \alpha_{\text{луч}}, \quad (33)$$

где  $\alpha_{\text{конв}}$  и  $\alpha_{\text{луч}}$  – коэффициенты теплоотдачи за счёт конвекции и излучения,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Так как линейное термическое сопротивление теплопроводности стенки  $R_{\ell, \lambda} \rightarrow 0$ , будем считать, что температура на внутренней и наружной поверхностях трубы одинакова и равна  $\bar{T}_w$ .

Рассчитать критерий Рэлея по формуле (11)

$$Ra = \frac{g \cdot d_{\text{нар}}^3}{\nu^2} \beta \cdot |\bar{T}_w - T_b| \cdot Pr, \quad (34)$$

где  $g = 9,8 \text{ м}^2/\text{с}$  – ускорение свободного падения;  
 $\beta = 1 / (T_b + 273)$  – коэффициент объемного расширения воздуха,  $1/\text{К}$ ;  
 $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  
 $Pr$  – критерий Прандтля.

Значения  $\nu$  и  $Pr$  находят по табл. П1 при температуре окружающего воздуха  $T_b$ .

Далее по формуле (25) рассчитать критерий Нуссельта  $Nu_2$  и найти коэффициент конвективной теплоотдачи  $\alpha_{\text{конв}}$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ,

$$\alpha_{\text{конв}} = Nu_2 \cdot \lambda_f / d_{\text{нар}}, \quad (35)$$

где  $\lambda_f$  – коэффициент теплопроводности воздуха,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .  
 Значение  $\lambda_f$  находят по табл. П1 при температуре окружающего воздуха  $T_b$ .

Определить коэффициент лучистой теплоотдачи  $\alpha_{\text{луч}}$  по формуле

$$\alpha_{\text{луч}} = \frac{\varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma_o \cdot \left[ (\bar{T}_w + 273)^4 - (T_b + 273)^4 \right]}{\bar{T}_w - T_b}, \quad (36)$$

где  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведенная степень черноты системы «наружная поверхность трубы – окружающая среда»;  $\sigma_o = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – постоянная Стефана-Больцмана.

Так как площадь окружающих поверхностей много больше площади наружной поверхности трубы можно принять  $\varepsilon_{\text{пр}} = \varepsilon_w$ .

По формуле (33) рассчитать коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности трубы в окружающую среду  $\alpha_2$ .

8. Найти потери теплоты с наружной поверхности трубы,  $\text{Вт}$ ,

$$Q_{\Pi} = \frac{\pi \cdot (\bar{T}_w - T_B)}{R_{\ell, \lambda} + R_{\ell, \alpha_2}} \cdot \ell, \quad (37)$$

где  $R_{\ell, \lambda}$  – линейное термическое сопротивление теплопроводности материала трубы, (м·К)/Вт;  $R_{\ell, \alpha_2}$  – линейное термическое сопротивление теплоотдачи от наружной поверхности трубы к окружающему воздуху, (м·К)/Вт.

$$R_{\ell, \lambda} = \frac{1}{2 \cdot \lambda_w} \ln \frac{d_{\text{нар}}}{d_{\text{вн}}}; \quad (38)$$

$$R_{\ell, \alpha_2} = \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_{\text{нар}}}, \quad (39)$$

где  $\lambda_w$  – коэффициент теплопроводности материала трубы, Вт/(м·К).

9. Определить коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности трубы к воздуху, Вт/(м<sup>2</sup>·К),

$$\alpha_1 = \frac{Q - Q_{\Pi}}{(\bar{T}_w - \bar{T}_f) \cdot \pi \cdot d_{\text{вн}} \cdot \ell}, \quad (40)$$

где  $\ell = 0,72$  м – длина трубы.

10. Рассчитать критерии Нуссельта и Рейнольдса

$$Nu_1 = \frac{\alpha_1 \cdot d_{\text{вн}}}{\lambda_f}; \quad (41)$$

$$Re_1 = \frac{w_o \cdot d_{\text{вн}}}{\nu}, \quad (42)$$

где  $\lambda_f$  – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К);  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости воздуха, м<sup>2</sup>/с.

Значения  $\lambda_f$  и  $\nu$  находят по табл. П1 при средней температуре воздуха в трубе  $\bar{T}_f$ .

По значению критерия Рейнольдса сделать вывод о режиме течения воздуха в трубе.

Расчеты с п. 1÷10 повторить для всех заданных преподавателем расходов воздуха.

11. Получить зависимость  $Nu_1 = f(Re_1)$  в виде  $Nu = C \cdot Re^n$ .

Для этого:

— занести в табл. 4 значения средней скорости воздуха в трубе ( $w_0$ ), коэффициента теплоотдачи ( $\alpha_1$ ), значения критериев  $Re_1$ ,  $Nu_1$  и их логарифмы  $\lg Re_1$ ,  $\lg Nu_1$  для всех заданных режимов движения воздуха;

— в системе координат  $\lg Nu_1 = f(\lg Re_1)$  нанести опытные точки (см. рис.2);

— аппроксимировать опытные данные прямой линией (нанести прямую линию на рисунок):

$$\lg Nu_1 = \lg C + n \cdot \lg Re_1 ; \quad (43)$$

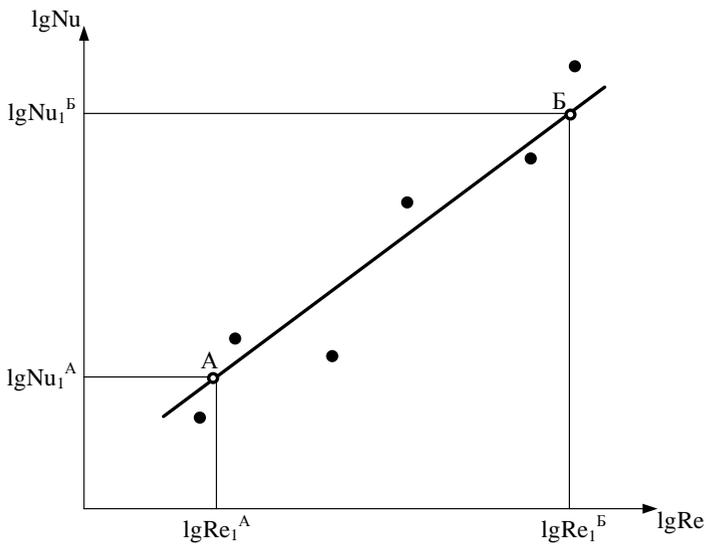
— на аппроксимирующей прямой выделить две точки А и Б, по координатам которых найти значения эмпирических коэффициентов С и n :

$$n = \frac{\lg Nu_1^B - \lg Nu_1^A}{\lg Re_1^B - \lg Re_1^A} ; \quad (44)$$

$$C = \frac{Nu_1^A}{(Re_1^A)^n} = \frac{Nu_1^B}{(Re_1^B)^n} . \quad (45)$$

## Журнал обработки результатов эксперимента

№ режима	Расчетные величины					
	$\alpha_1,$ Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$w_0,$ м/с	$Nu_1$	$Re_1$	$\lg Nu_1$	$\lg Re_1$
1						
2						
⋮						
N						

Рис.2. К расчету коэффициентов аппроксимации  $C$  и  $n$

## 6. Сравнение результатов эксперимента с опытными данными академика М.А. Михеева

Коллективом ученых под руководством академика М.А. Михеева выполнены эксперименты по исследованию теплоотдачи в трубах и каналах. Результаты этих многочисленных экспериментов представлены в виде критериальных формул (22) ÷ (24).

Расчет коэффициента теплоотдачи по критериальным формулам рекомендуется выполнять следующим образом:

— в зависимости от режима движения воздуха, который был определен ранее в п.10 раздела 5, выбрать расчетную формулу и найти критерий Нуссельта;

— по значению критерия Нуссельта рассчитать коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_1^{\text{Михеев}} = \text{Nu} \cdot \lambda_f / d_{\text{вн}}, \quad (45)$$

где  $\lambda_f$ — коэффициент теплопроводности воздуха при его средней температуре, Вт/(м·К.

Сравнить результат расчета коэффициента теплоотдачи по формуле М.А. Михеева с экспериментальным значением коэффициента теплоотдачи  $\alpha_1$  :

$$\varepsilon = (\alpha_1 - \alpha_1^{\text{Михеев}}) / \alpha_1^{\text{Михеев}} \cdot 100\% . \quad (46)$$

### Отчет о выполнении лабораторной работы должен содержать:

- задание на выполнение лабораторной работы;
- схему экспериментального стенда;
- журналы наблюдений и обработки результатов эксперимента;
- анализ результатов эксперимента;
- выводы по работе.

## 7. Контрольные вопросы

1. Какие виды теплообмена Вы знаете? Какой вид теплообмена исследуется в данной лабораторной работе?
2. Дайте определение понятий *конвекция*, *конвективный теплообмен*, *конвективная теплоотдача*.
3. Сформулируйте закон конвективной теплоотдачи. Напишите его математическое выражение и поясните входящие в него величины.
4. Поясните физический смысл коэффициента теплоотдачи. Напишите формулу, лежащую в основе его экспериментального определения.
5. Поясните отличие процессов теплоотдачи при свободной и вынужденной конвекции.
6. Дайте определение критерию подобия. На какие группы подразделяют критерии подобия?
7. Перечислите известные Вам определяемые критерии подобия.
8. Перечислите известные Вам определяющие критерии подобия.
9. Что характеризует уравнение подобия?
10. Назовите способы вывода критериев подобия.
11. Перечислите определяющие параметры в уравнениях подобия. Дайте их определения.
12. Назовите определяющий размер при вынужденном движении в круглых трубах и в каналах произвольного поперечного сечения. Дайте его определение.
13. Как влияет длина трубы на коэффициент теплоотдачи? Каким образом длину учитывают в критериальных уравнениях.

14. Перечислите режимы течения флюида при вынужденном движении в трубах. Дайте их характеристику.
15. Поясните принцип работы и назначение элементов экспериментальной установки.
16. Перечислите измерительные приборы и дайте характеристику измеряемых величин, указав единицы их измерения.
17. С какой целью задают определяющую температуру в уравнениях подобия? Дайте её определение.
18. Напишите формулу и поясните физический смысл критерия Нуссельта.
19. Напишите формулу и поясните физический смысл критерия Рейнольдса.
20. Напишите формулу и поясните физический смысл критерия Пекле.
21. Напишите формулу и поясните физический смысл критерия Фруда.
22. Напишите формулу и поясните физический смысл критерия Галилея.
23. Напишите формулу и поясните физический смысл критерия Архимеда.
24. Напишите формулу и поясните физический смысл критерия Грасгофа.
25. Напишите формулу и поясните физический смысл критерия Рэлея.
26. Напишите формулу и поясните физический смысл критерия Прандтля.
27. Назовите возможные режимы вынужденного движения флюида в трубах. Назовите условия смены режимов движения в трубах.

28. Опишите способ определения коэффициента объемного расширения для капельных жидкостей и газов?
29. Поясните смысл локального и среднего коэффициентов теплоотдачи.
30. Дайте определение понятия «сложный теплообмен»? Какую роль играет теплообмен излучением в проведенных опытах?
31. Опишите устройство термоэлектрического термометра (термопары)? Поясните принцип измерения температуры при помощи термопар.

## 8. Рекомендуемая литература

1. Бухмиров В.В. Теоретические основы теплотехники. Тепломассообмен: лекции. [Электронный ресурс]// ispu.ru: ИГЭУ. Иваново, 2008. URL: <http://ispu.ru/node/11800>.
2. Бухмиров В.В. Расчет коэффициента конвективной теплоотдачи (основные критериальные уравнения). [Электронный ресурс] // ispu.ru: ИГЭУ. Иваново, 2006. URL: <http://ispu.ru/node/11800>.
3. Бухмиров В.В. Теоретические основы теплотехники. Основы тепломассообмена/ ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2011. – 68 с.
4. Бухмиров В.В., Ракутина Д.В., Солнышкова Ю.С. Справочные материалы для решения задач по курсу «Тепломассообмен»: учеб. пособие / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2009.– 104 с.

## Приложение

Таблица П1

Физические свойства сухого воздуха ( $B=1,01 \cdot 10^5$  Па)

T, °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$ , Вт/(м·К)	$\mu \cdot 10^6$ , Па·с	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$a \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	Pr
-50	1,584	1,013	2,04	14,6	9,23	14,6	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	15,2	10,04	15,2	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	15,7	10,80	15,7	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	12,79	16,2	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	16,7	12,43	16,7	0,712
0	1,293	1,005	2,44	17,2	13,28	17,2	0,707
10	1,247	1,005	2,51	17,6	14,16	17,6	0,705
20	1,205	1,005	2,59	18,1	15,06	18,1	0,703
30	1,165	1,005	2,67	18,6	16,00	18,6	0,701
40	1,128	1,005	2,76	19,1	16,96	19,1	0,699
50	1,093	1,005	2,83	19,6	17,95	19,6	0,698
60	1,060	1,005	2,90	20,1	18,97	20,1	0,696
70	1,029	1,009	2,96	20,6	20,02	20,6	0,694
80	1,000	1,009	3,05	21,1	21,09	21,1	0,692
90	0,972	1,009	3,13	21,5	22,10	21,5	0,690
100	0,946	1,009	3,21	21,9	23,13	21,9	0,688
120	0,898	1,009	3,34	22,8	25,45	22,8	0,686
140	0,854	1,013	3,49	23,7	27,80	23,7	0,684
160	0,815	1,017	3,64	24,5	30,09	24,5	0,682
180	0,779	1,022	3,78	25,3	32,49	25,3	0,681
200	0,746	1,026	3,93	26,0	34,85	26,0	0,680
250	0,674	1,038	4,27	27,4	40,61	27,4	0,677
300	0,615	1,047	4,60	29,7	48,33	29,7	0,674
350	0,566	1,059	4,91	31,4	55,46	31,4	0,676
400	0,524	1,068	5,21	33,0	63,09	33,0	0,678
500	0,456	1,093	5,74	36,2	79,38	36,2	0,687
600	0,404	1,114	6,22	39,1	96,89	39,1	0,699
700	0,362	1,135	6,71	41,8	115,4	41,8	0,706
800	0,329	1,156	7,18	44,3	134,8	44,3	0,713
900	0,301	1,172	7,63	46,7	155,1	46,7	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	49,0	177,1	49,0	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	51,2	199,3	51,2	0,722
1200	0,239	1,210	9,15	53,5	233,7	53,5	0,724

## Содержание

1.Задание	3
2. Краткие сведения из теории конвективного теплообмена	3
3. Экспериментальная установка	12
4. Порядок проведения эксперимента	14
5. Обработка результатов эксперимента	15
6. Сравнение результатов эксперимента с опытными данными академика М.А. Михеева	21
7. Контрольные вопросы	22
8. Рекомендуемая литература	25
Приложение	26

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ  
ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ДВИЖЕНИИ  
ВОЗДУХА В ТРУБЕ МЕТОДОМ  
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Методические указания к выполнению лабораторной работы

Составители: БУХМИРОВ Вячеслав Викторович

РАКУТИНА Дарья Валерьевна

Редактор Т.В. Соловьева

Подписано в печать

. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Печать плоская. Усл.печ.л. 1,62. Тираж 100 экз. Заказ № .

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический  
университет имени В.И. Ленина»

153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34