

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧЕРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

«ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ В.И. ЛЕНИНА»

Кафедра теоретических основ теплотехники

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ  
ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ДВИЖЕНИИ  
ВОЗДУХА В ТРУБЕ**

Методические указания к выполнению лабораторной работы

Иваново 2006

Составители            В.В. Бухмиров  
                                  Н.С. Ершова  
                                  Г.Н. Щербакова  
Редактор                Д.В. Ракутина

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по специальностям теплотехнического профиля 140101, 140103, 140104, 140106 и 220301 и изучающих курс “Тепломассообмен” или “Теплотехника”.

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

Методические указания утверждены цикловой методической комиссией ТЭФ.

Рецензент

кафедра теоретических основ теплотехники Ивановского государственного энергетического университета

## 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 результаты опытного и расчетного определения коэффициента теплоотдачи.
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 Ньютона:

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

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 при вынужденном движении в трубах имеют вид:

— ламинарный режим течения флюида

$$\text{Nu} = f(\text{Gr}, \text{Re}, \text{Pr}, \ell/d); \quad (3)$$

— переходный и турбулентный режимы течения флюида

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}, \ell/d), \quad (4)$$

где  $\text{Nu}$ ,  $\text{Gr}$ ,  $\text{Re}$ ,  $\text{Pr}$  – критерии подобия;  $\ell/d$  – симплекс, от значения которого зависит величина поправки, учитывающая влияние на теплоотдачу длины начального участка гидродинамической и тепловой стабилизации;  $\ell$  – длина трубы, м;  $d$  – внутренний диаметр трубы, м..

*Критерий подобия* – безразмерный комплекс, составленный из физических величин, который *характеризует* отношение физических эффектов, но не является этим отношением.

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) и (4) определяемым является критерий Нуссельта ( $\text{Nu}$ ), а определяющими критериями – критерий Грасгофа ( $\text{Gr}$ ), критерий Рэйнольдса ( $\text{Re}$ ) и критерий Прандтля ( $\text{Pr}$ ).

Критерий **Нуссельта** или **Нуссельт** характеризует отношение теплового потока конвективной теплоотдачей к кондуктивному тепловому потоку в пограничном слое текучей среды вблизи стенки:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot R_0}{\lambda}, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $R_0$  – определяющий или характерный размер, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности текучей среды,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

Критерий **Грасгофа** или **Грасгоф** характеризует отношение термо-гравитационной силы к силе вязкого трения:

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot R_0^3}{\nu^2} \beta \cdot \Delta T, \quad (6)$$

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

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

$$\beta = \frac{1}{T_0}, \quad (7)$$

где  $T_0$  – определяющая температура в **Кельвинах!**

Критерий **Рейнольдса** или **Рейнольдс** (критерий динамического подобия) характеризует отношение силы инерции к силе вязкого трения:

$$\text{Re} = \frac{w_0 \cdot R_0}{\nu}, \quad (8)$$

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 Re судит о режиме течения флюида при вынужденной конвекции.

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

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a}, \quad (9)$$

где  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости текучей среды, м<sup>2</sup>/с;  $a$  – коэффициент температуропроводности флюида, м<sup>2</sup>/с.

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. При расчете теплоотдачи в трубах и каналах в качестве определяющей температуры принимают среднюю температуру флюида:

$$T_0 = \bar{T}_f = 0,5 \cdot (T_{f,\text{вх}} + T_{f,\text{вых}}), \quad (10)$$

где  $T_{f,\text{вх}}$ ,  $T_{f,\text{вых}}$  – температура флюида на входе и выходе из трубы или канала.

В качестве определяющего размера при расчете теплоотдачи в трубах и каналах принимают внутренний диаметр трубы ( $R_0 = d$ ).

Определяющую скорость находят из уравнения неразрывности:

$$w_0 = G / (\rho \cdot f), \quad (11)$$

где  $G$  – расход флюида, кг/с;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $f$  – площадь поперечного сечения для прохода теплоносителя, м<sup>2</sup>.

Конкретный вид функциональной зависимости в уравнениях подобия принимает ученый – автор 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:

— ламинарный режим течения флюида

$$\overline{Nu} = C \cdot Gr^k \cdot Re^n \cdot Pr^m \cdot \varepsilon_t \cdot \overline{\varepsilon_\ell}; \quad (12)$$

— переходный и турбулентный режимы течения флюида

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

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:

$$\varepsilon_t = \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}, \quad (14)$$

где  $Pr_f$  – критерий Прандтля, который находят по таблицам физических свойств флюида при определяющей температуре;  $Pr_w$  – критерий Прандтля, который находят по таблицам физических свойств флюида при температуре стенки.

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.

*Ламинарный вязкостно-гравитационный режим течения*  
( $Re_{f,d} \leq 2300$ )

Приближённая оценка среднего коэффициента теплоотдачи может быть произведена по критериальному уравнению, полученному М. А. Михеевым:

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

Поправочный коэффициент  $\overline{\varepsilon}_\ell$  учитывает влияние начального участка тепловой и гидродинамической стабилизации потока:  
при  $\ell/d \geq 50$  значение  $\overline{\varepsilon}_\ell = 1$ ;  
при  $\ell/d < 50$  значение  $\overline{\varepsilon}_\ell$  определяется по таблице.1.

Таблица.1.

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

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

*Турбулентный режим течения*  
( $Re_{f,d} > 10^4$ )

Средний коэффициент теплоотдачи при турбулентном течении несжимаемой жидкости с числами  $Pr > 0,7$  и  $Re > 10^4$  в прямых гладких трубах рассчитывается по формуле М. А. Михеева:

$$\overline{Nu}_{f,d} = 0,021 \cdot Re_{f,d}^{0,8} \cdot Pr_f^{0,43} \cdot \varepsilon_t \cdot \overline{\varepsilon}_\ell \quad (16)$$

Величина  $\overline{\varepsilon}_\ell$  - поправка, учитывающая изменение коэффициента теплоотдачи на начальном участке гидродинамической и тепловой стабилизации:

при  $\ell/d > 50$  значение  $\overline{\varepsilon}_\ell = 1$ ;  
при  $\ell/d < 50$  значение  $\overline{\varepsilon}_\ell \approx 1 + 2d/\ell$ .

*Переходный режим течения флюида*  
 $(2300 \leq Re_{f,d} \leq 10^4)$

Переходный режим течения характеризуется перемежаемостью ламинарного и турбулентного течений. Приближённо коэффициент теплоотдачи можно рассчитать по формуле:

$$\overline{Nu}_{f,d} = K_0 \cdot Pr_{f,d}^{0,43} \cdot \varepsilon_t \cdot \bar{\varepsilon}_\ell, \quad (17)$$

где значение комплекса  $K_0$  зависит от числа Рейнольдса и приведено в таблице 2, а поправка на начальный участок  $\bar{\varepsilon}_\ell$  рассчитывается также как и при турбулентном режиме течения флюида.

Таблица 2.  
 Зависимость комплекса  $K_0$  от числа Рейнольдса

<b>Re · 10<sup>-3</sup></b>	2,2	2,3	2,5	3,0	3,5	4,0	5	6	7	8	9	10
<b>K<sub>0</sub></b>	2,2	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 (15), (16) и (17) можно записать в следующем виде:

ламинарный режим  $\overline{Nu}_{f,d} = 0,146 \cdot Re_{f,d}^{0,33} \cdot Gr_{f,d}^{0,1}; \quad (18)$

турбулентный режим  $\overline{Nu}_{f,d} = 0,018 \cdot Re_{f,d}^{0,8}; \quad (19)$

переходный режим  $\overline{Nu}_{f,d} = 0,86 \cdot K_0. \quad (20)$

### 3. Экспериментальная установка

Рабочий участок экспериментальной установки (рис.1) состоит из стальной трубы (1) с внутренним диаметром  $d = 30$  мм и длиной  $\ell = 1,45$  м. На наружной поверхности трубы расположен электрический нагреватель из нихромовой проволоки (2). Напряжение на нихромовом нагревателе изменяется при помощи автотрансформатора

(3). Труба (1) помещена в кожух (4). При этом межтрубное (кольцевое) пространство заполнено тепловой изоляцией (5). Воздух в трубу подается вентилятором (6). Число оборотов двигателя вентилятора, а, следовательно, и расход воздуха можно регулировать, изменяя напряжение на выходе лабораторного автотрансформатора (7). Для измерения расхода воздуха, в выходной части трубы установлено суживающееся сопло (8), диаметр которого  $d_c = 20$  мм. Перепад давления между окружающей средой и потоком воздуха в проточной части на выходе из сопла измеряется тягонапоромером (9).

Для измерения средней температуры внутренней поверхности трубы ( $T_w$ ) на этой поверхности установлены пять рабочих (горячих) спаев медь-константановых термопар (10). Для измерения температуры воздуха на выходе из трубы ( $T_{f,вых}$ ) в поток воздуха перед соплом помещен горячий спай шестой медь-константановой термопары (11). Температура воздуха на входе в трубу ( $T_{f,вх}$ ) равна температуре воздуха в лаборатории и измеряется ртутным термометром (17). Термопары поочередно подключаются к цифровому милливольтметру (12) при помощи переключателя (13). Холодный спай (14) является общим для всех термопар. Он помещен в латунную гильзу (15), заполненную машинным маслом (16) и находится при температуре окружающей среды.

#### 4. Порядок проведения эксперимента

##### *Внимание!*

*Инженер включает и выключает экспериментальную установку и производит изменение режима движения воздуха в трубе.*

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

2. После включения стенда и выставления инженером заданных преподавателем мощности нагревателя и расхода воздуха происходит нагрев рабочей зоны установки. Этот нестационарный процесс теплообмена фиксируют, записывая каждые 5 минут показания измерительных приборов в журнал наблюдений (табл. 3).

3. Эксперимент считают законченным после установления стационарного режима теплообмена, при котором измеряемые величины не изменяются во времени. В стационарном режиме выполнить не менее двух измерений. Сообщить о результатах эксперимента преподавателю.

4. По указанию преподавателя инженер устанавливает другой расход воздуха в трубе, изменяя число оборотов двигателя вентилятора при помощи автотрансформатора (7).

5. При неизменной мощности на нагревателе и новом расходе воздуха происходит переходный процесс теплообмена, который фиксируют в журнал наблюдений аналогично действиям, изложенным в пунктах 2 и 3.

6. Опыты с разным расходом воздуха выполняют не менее двух раз (по указанию преподавателя).

7. Занести в журнал наблюдений температуру окружающей среды, используя показания ртутного термометра (17),

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

Таблица 3.

Журнал наблюдений

Время	Показания термомпар, $\Delta E$						Перепад давления	Температура воздуха в лаборатории
	На стенке трубы					На выходе воздуха		
	1	2	3	4	5	6		
мин	мВ	мВ	мВ	мВ	мВ	мВ	Па	$^{\circ}C$
0								
5								
10								
...								

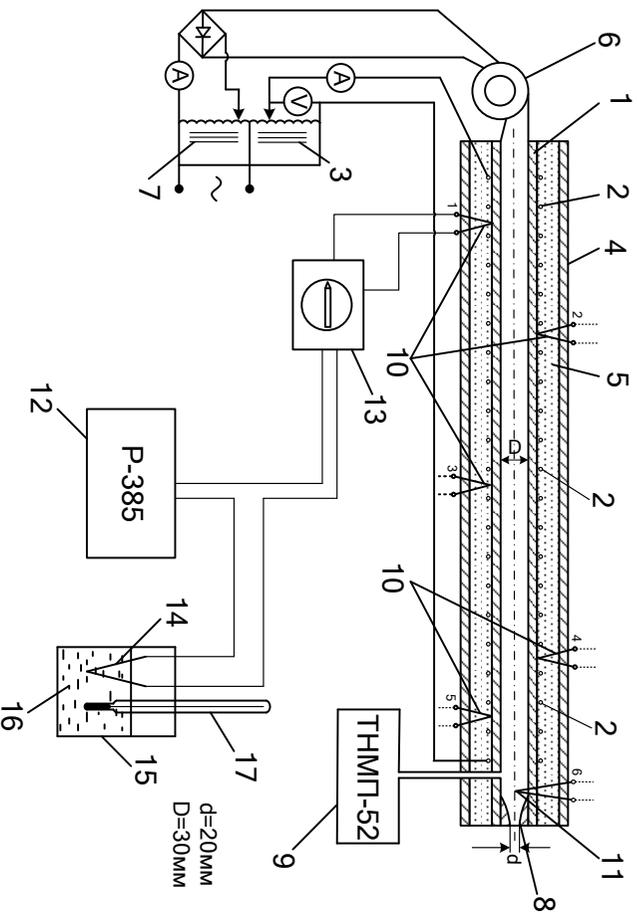


Рис. 1. Экспериментальная схема установки:

1 - стальная труба; 2 - нагреватель; 3 - автотрансформатор  
 нагревателя; 4 - наружный кожух трубы; 5 - тепловая изоляция; 6 -  
 вентилятор; 7 - автотрансформатор вентилятора; 8 - солло; 9 -  
 термопары; 10, 11 - горячие спай термопар; 12 - потенциометр; 13  
 - переключатель термопар;  
 14 - холодный спай термопар; 15 - гильза; 16 - масло; 17 - термометр.

## 5. Анализ результатов эксперимента

1. При помощи градуировочной таблицы для медь-константановых термопар определить перепад температур между горячим и холодным спаями всех шести термопар  $\Delta T_i = f(\Delta E_i)$ .

2. Найти температуру внутренней поверхности трубы в точках установки горячих спаев термопар и температуру воздуха на выходе из трубы по формуле:

$$T_i = \Delta T_i + T_{oc}, \quad (21)$$

где  $\Delta T_i$  – перепад температур на  $i$ -ой термопаре, °C; температура воздуха в лаборатории, °C.

3. Рассчитать среднюю температуру внутренней стенки трубы:

$$T_w = \sum_{i=1}^5 T_i / 5. \quad (22)$$

4. Рассчитать среднюю температуру воздуха в трубе по формуле:

$$T_0 = \bar{T}_r = 0,5 \cdot (T_{f,вх} + T_{f,вых}) = 0,5 \cdot (T_{oc} + T_6), \quad (23)$$

где  $T_{f,вх} = T_{oc}$  – температура окружающей среды, °C;  $T_{f,вых} = T_6$  – температура воздуха на выходе из трубы (по показаниям шестой термопары), °C.

5. Рассчитать скорость воздуха на выходе из сопла по формуле:

$$w_c = \frac{\varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{d_c}{d}\right)^4}} \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta P}{\rho_c}}, \quad (24)$$

где  $\varphi=0,97$  – коэффициент сопла, учитывающий потери на трение;  $d_c$  – диаметр выходного (минимального) отверстия сопла, м;  $d$  – внутренний диаметр трубы;  $\Delta P$  – перепад давления между окружающей средой и потоком воздуха в проточной части на выходе из сопла, Па;  $\rho_c$  – плотность воздуха на выходе из сопла,  $\text{кг/м}^3$  – при адиабатном истечении находят по справочным таблицам при температуре воздуха на выходе из трубы.

6. Рассчитать расход воздуха в трубе:

$$G = \rho_c \cdot w_c \cdot f_c, \quad (25)$$

где  $f_c = \pi \cdot d_c^2 / 4$  – площадь поперечного сечения сопла,  $\text{м}^2$ .

7. Рассчитать среднюю скорость воздуха в трубе по формуле (14), в которой площадь поперечного сечения трубы равна  $f = \pi \cdot d^2 / 4$ , а плотность воздуха находят по справочным таблицам [2] при средней температуре воздуха в трубе (см. п.4).

8. По изменению энтальпии воздуха в трубе определить тепловой поток, передаваемый от поверхности трубы к воздуху:

$$Q = G \cdot (h_{f, \text{ВЫХ}} - h_{f, \text{ВХ}}) = G \cdot c_p \cdot (T_{f, \text{ВЫХ}} - T_{f, \text{ВХ}}). \quad (26)$$

где  $h_{f, \text{ВХ}}$ ,  $h_{f, \text{ВЫХ}}$  – энтальпия воздуха на входе и выходе из трубы, Дж/кг;  $c_p$  – изобарная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К) – находят по справочным таблицам [2] при средней температуре воздуха в трубе.

9. Найти опытное значение коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha^{\text{оп}} = \frac{Q}{(T_w - \overline{T_f}) \cdot F}, \quad (27)$$

где  $F = \pi \cdot d \cdot \ell$  – площадь внутренней поверхности трубы,  $\text{м}^2$ ;  $d$  и  $\ell$  – внутренний диаметр и длина трубы, м.

10. По формуле (5) рассчитать критерии Нуссельта для всех заданных расходов воздуха.

11. По формуле (8) рассчитать критерии Рейнольдса для всех заданных расходов воздуха. Сделать вывод о режиме течения воздуха в трубе.

12. Получить зависимость  $Nu = f(Re)$  в виде  $\overline{Nu} = C \cdot Re^n$ . Для этого:

— занести в таблицу 4 значения средней скорости воздуха в трубе ( $w_0$ ), коэффициента теплоотдачи ( $\alpha$ ), значения критериев  $Re$ ,  $Nu$  и их логарифмы  $\lg Re$ ,  $\lg Nu$  для всех заданных режимов движения воздуха;

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

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

$$\lg Nu = \lg C + n \cdot \lg Re. \quad (28)$$

— на аппроксимирующей прямой выделить две точки 1 и 2, по координатам которых найти значения эмпирических коэффициентов  $C$  и  $n$ :

$$n = \frac{\lg Nu_2 - \lg Nu_1}{\lg Re_2 - \lg Re_1}; \quad (29)$$

$$C = \frac{Nu_1}{Re_1^n} = \frac{Nu_2}{Re_2^n} . \quad (30)$$

Таблица 4.

Журнал обработки результатов эксперимента

№ режима	Расчетные величины					
	$\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$w_0, \text{м}/\text{с}$	Nu	Re	lg Nu	lg Re
1						
2						
⋮						
N						

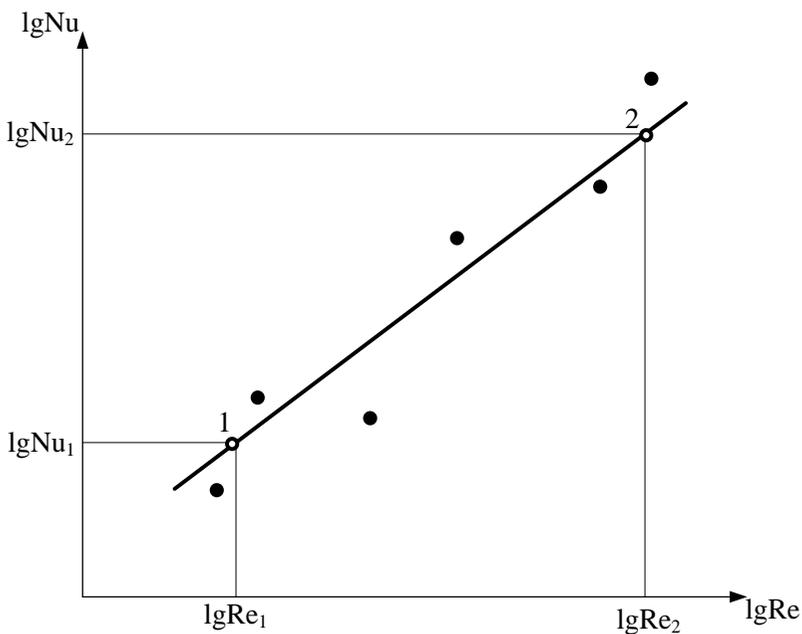


Рис.2. К расчету коэффициентов аппроксимации C и n

## 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 (15) ÷ (17), которые для воздуха можно записать в виде (18) ÷ (20).

Расчет коэффициента теплоотдачи по критериальным формулам рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

- в зависимости от режима движения воздуха, который был определен ранее в п.11 раздела 5, выбрать расчетную формулу и найти критерий Нуссельта;
- по значению критерия Нуссельта рассчитать коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha^{\text{Михеев}} = \text{Nu} \cdot \lambda / d . \quad (30)$$

Сравнить коэффициент теплоотдачи, рассчитанный по формуле М.А. Михеева с коэффициентом теплоотдачи  $\alpha^{\text{оп}}$ , полученным в Вашем эксперименте:

$$\varepsilon = (\alpha^{\text{оп}} - \alpha^{\text{Михеев}}) / \alpha^{\text{Михеев}} \cdot 100\% , \quad (31)$$

где  $\alpha^{\text{оп}}$  – коэффициент теплоотдачи, полученный в Вашем опыте;  
 $\alpha^{\text{Михеев}}$  – коэффициент теплоотдачи, рассчитанный по формуле М.А. Михеева.

### **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 такое уравнения подобия?
10. Назовите способы вывода критериев подобия.
11. Что такое определяющие параметры?
12. Что такое определяющий размер? Как он выбирается при вынужденном движении в круглых трубах и в каналах произвольного поперечного сечения?
13. Как влияет длина трубы на коэффициент теплоотдачи? Каким образом она учитывается 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. Что такое определяющая температура? Как ее используют в расчетах конвективной теплоотдачи?
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. Как определить коэффициент объемного расширения для капельных жидкостей и газов?
29. Поясните смысл локального и среднего коэффициентов теплоотдачи.
30. Что называют сложным теплообменом? Какую роль играет теплообмен излучением в проведенных опытах?

31. Что такое термопара? Поясните принцип измерения температуры при помощи термопар.
32. Поясните принцип определения массового расхода при помощи суживающего устройства. Поясните производимые при этом расчеты.
33. Поясните принцип определения теплового потока в данной работе.
34. Поясните принцип определения средней скорости движения воздуха в трубе.

## **8. Рекомендуемая литература**

1. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: Учеб. для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.:Энергоиздат, 1981. – 416 с.
2. Краснощеков Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче: Учеб. пособие для вузов.– 4-е изд., перераб. – М.:Энергия, 1981. – 240 с.

## Содержание

1. Задание	3
2. Краткие сведения из теории конвективного теплообмена	3
3. Экспериментальная установка	8
4. Порядок проведения эксперимента	9
5. Обработка результатов эксперимента	12
6. Сравнение результатов эксперимента с опытными данными академика М.А. Михеева	15
7. Контрольные вопросы	16
8. Рекомендуемая литература	18

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ  
ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ДВИЖЕНИИ  
ВОЗДУХА В ТРУБЕ

Методические указания к выполнению лабораторной работы

Составители: БУХМИРОВ Вячеслав Викторович  
ЕРШОВА Наталья Сергеевна  
ЩЕРБАКОВА Галина Наумовна

Редактор Н.Б. Михалева

Лицензия ЛР № 020264 от 15.12.96 г.

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

Печать плоская. Усл.печ.л.0,93. Тираж . Заказ .

Ивановский государственный энергетический университет

Отпечатано в ОМТ МИБИФ

153003 Иваново, ул. Рабфаковская, 34