

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

# Методические указания

к лабораторной работе  
«Исследование теплопередачи при естественной конвекции  
воздуха около горизонтального цилиндра»

*по курсу «Тепломассообмен»*

для студентов специальности  
1-70 04 02 – Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана  
воздушного бассейна»



УДК 536.7: 621.036

В методических указаниях к лабораторной работе «Исследование теплопередачи при естественной конвекции воздуха около горизонтального цилиндра» по курсу «Тепломассообмен» приводится описание используемой экспериментальной установки. Пояснена методика определения двумя способами коэффициента теплоотдачи при естественной конвекции. В первом случае коэффициент теплоотдачи при естественной конвекции для горизонтального цилиндра определяется опытным путем. Во втором случае коэффициент теплоотдачи одиночного горизонтального цилиндра находится по критериальному уравнению подобия.

Методические указания предназначены для студентов факультета инженерных систем и экологии и инженерно-экономического факультета заочного образования обучающихся по специальности 1-70 04 02 – Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна.

Составители: А.И. Пинчук, к.ф.-м.н., доцент  
В.В. Борушко, ст. преподаватель  
Н.Ф. Клименко, инженер-электроник

Рецензент: В.С. Секержицкий, к.ф.-м.н., доцент УО «Брестский  
государственный университет им. А.С. Пушкина»

Учреждение образования  
© «Брестский государственный технический университет», 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Лабораторная работа ТМО-2 (стенд) ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА ОКОЛО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЦИЛИНДРА.....</b>	<b>4</b>
<b>Описание экспериментальной установки .....</b>	<b>4</b>
<b>Порядок проведения эксперимента .....</b>	<b>5</b>
<b>Порядок расчета .....</b>	<b>6</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ .....</b>	<b>7</b>

## Лабораторная работа ТМО-2 (стенд) ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА ОКОЛО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЦИЛИНДРА

**Цель работы:** изучение закономерностей свободной конвективной теплоотдачи от горизонтального цилиндра к воздуху в неограниченном пространстве с применением теории подобия; определение коэффициента конвективной теплоотдачи опытным и расчетным путем.

**Приборы и принадлежности:** стенд НТЦ-22.05.1 «Теплотехника и термодинамика» со съемным модулем НТЦ-22.05.1/3 «Исследование теплопередачи при естественной конвекции воздуха около горизонтального цилиндра».

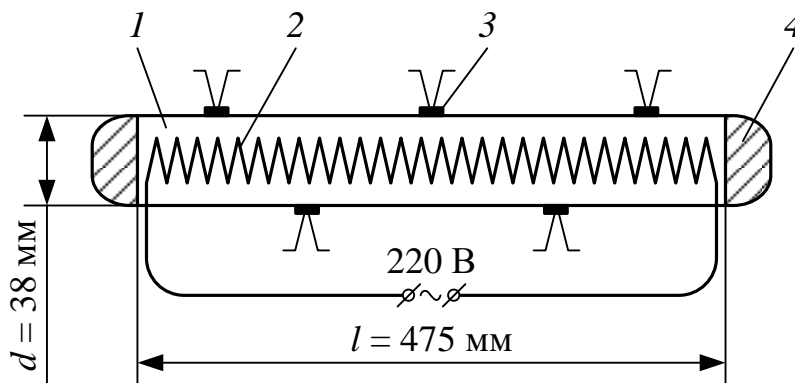
### Описание экспериментальной установки

Эксперимент проводится на лабораторном стенде, с использованием модуля, фотография которого приведена на рисунке 1, схематично изображенного на рисунке 2.



*Рисунок 1 – Модуль НТЦ-22.05.1/3 «Исследование теплопередачи при естественной конвекции воздуха около горизонтального цилиндра»*

Модуль представляет собой отрезок стальной трубы длиной  $l = 475$  мм наружного диаметра  $d = 34$  мм. Снаружи поверхность трубы покрыта тонким слоем никеля. Ее площадь рассчитывается по формуле  $F = \pi dl$ .  $F = 0,051$  м<sup>2</sup>.

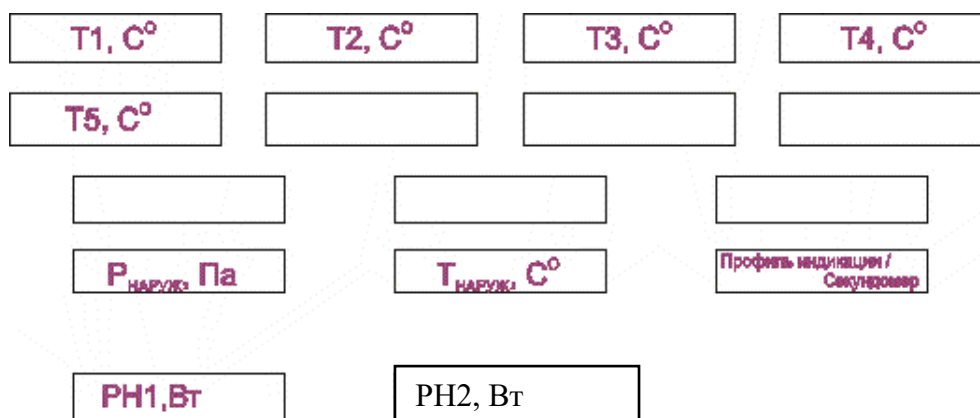


*Рисунок 2 – Схематический чертеж экспериментального модуля*

Внутри трубы 1 помещен электрический нагреватель 2, питаемый переменным током, мощность которого регулируется. Торцевые сечения трубы заделаны текстолитовыми дисками 4, предотвращающими осевые утечки тепла. На

поверхности опытной трубы установлено пять термопреобразователей 3, из которых три преобразователя равномерно размещены по длине вдоль образующей трубы, а два оставшихся расположены на диаметрально противоположной образующей. Это позволяет измерить среднюю температуру внешней поверхности трубы.

Сигналы датчиков регистрируются приборами лабораторного стенда, которые показывают локальные температуры поверхности цилиндра; температуру окружающего воздуха и тепловой поток (подведенную электрическую мощность). Конфигурация индикаторов, используемых в данной работе, изображена на рисунке 3.



*Рисунок 3 – Конфигурация активных индикаторов приборной панели*

Сразу после включения нагревателя происходят процессы нагрева цилиндра и теплообмена с окружающей средой. Спустя некоторый промежуток времени после начала нагревания цилиндра температура его поверхности перестанет изменяться – наступит стационарный режим. Все подводимое к цилиндру тепло будет передаваться воздуху путем конвекции и лучеиспускания. Именно этими двумя процессами при заданной мощности нагрева и будет определяться температура поверхности цилиндра. Знание значений температур среды и поверхности цилиндра, а также мощности нагревателя позволит провести анализ процесса теплообмена с использованием приведенных в Приложении соотношений.

### Порядок проведения эксперимента

1. Установить Модуль НТЦ-22.05.1/3 «Исследование теплопередачи при естественной конвекции воздуха около горизонтального цилиндра» (рисунок 1) на перфорированную панель и закрепить поворотом крепежных рукояток во встречном направлении на четверть оборота. Подключить кабель модуля к разъему X10 на панели стенда.

2. Убедиться в том, что переключатели установлены в положения: SA1 – «выкл», SA2 (Насос-1) – «выкл», SA3 – «нижнее», SA4 (Насос-2) – «выкл», SA5 – «выкл», SA6 – «выкл», SA14 – min, SA15 – min, SA16 – min.

3. Включить автоматические выключатели QF1 и QF2 на панели стенда. Установить профиль индикации «L 2». Конфигурация отображаемых на индикаторах параметров изображена на рисунке 3.

4. По указанию преподавателя регуляторами SA14 (PH1) и SA15 (PH2) установить требуемую мощность электронагревателя  $Q$ ; (регулятор SA15 (PH2) обеспечивает более плавную настройку мощности электронагревателя  $Q$ ).

5. Наблюдать за значениями температур  $t_1, t_2, t_3, t_4$  и  $t_5, ^\circ\text{C}$  (по показаниям датчиков T1-T5, соответственно) и по достижению их неизменности во времени (приблизительно 15 мин.) считать, что наступил стационарный тепловой режим. Занести в таблицу 1 стационарные значения локальных температур и температуры воздуха в градусах Цельсия и в Кельвинах, а также теплового потока  $Q$  (сумма показаний регулятора PH1 и регулятора PH2).

6. По завершении опыта регуляторами мощности SA14 (PH1) и SA15 (PH2) установить увеличенное значение  $Q$  и повторить опыт несколько раз по указанию преподавателя.

7. После выполнения работы регуляторами SA14 (PH1) и SA15 (PH2) установить мощность электронагревателя на нулевое значение.

8. Выключить автоматические выключатели QF1 и QF2 на панели стенда.

Таблица 1 – Результаты прямых измерений

Номер опыта	Тепловой поток, $Q$ , (Вт)	Температура воздуха $t_\infty$ , ( $^\circ\text{C}/\text{K}$ )	Температура поверхности стенки трубы в локальных точках, ( $^\circ\text{C}, \text{K}$ )					Средняя температура поверхности стенки трубы $t_0$ , ( $^\circ\text{C}/\text{K}$ ) $t_0 = \frac{(t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5)}{5}$
			$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	
I								
II								
III								

### Порядок расчета

1. Определить значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  первым способом на основе закона Ньютона-Рихмана, воспользовавшись соотношениями (П.7)–(П.9) для каждого значения мощности нагревателя. Принять, что для никелированной трубы коэффициент черноты равен  $\varepsilon=0.11$ .

2. Провести расчеты значения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  вторым способом для каждого значения мощности нагревателя  $Q$  на основе соотношений метода подобия. Для этого в каждом случае:

- определить число Грасгофа  $Gr = (\beta g l \Delta t) / \nu^2$ , где  $l$  – определяющий размер, (в данном случае – диаметр цилиндра,  $d$ );  $\Delta t = t_0 - t_\infty$  – разность между средней температурой поверхности цилиндра и воздуха. Теплофизические свойства сухого воздуха приведены в таблице 2. Их следует выбирать для определяющей температуры, равной среднему арифметическому между средней температурой поверхности цилиндра и температурой воздуха:  $t_m = (t_0 + t_\infty) / 2$ ;

- принять значение числа Прандтля  $Pr=0.71$ , как одно из табличных значений теплофизических свойств сухого воздуха, поскольку оно определяется только через теплофизические константы;

Таблица 2 – Теплофизические свойства сухого воздуха

$t_m, ^\circ\text{C}$	Коэффициент теплопроводности $\lambda \cdot 10^2, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	Кинематический коэффициент вязкости $\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Коэффициент объемного расширения $\beta \cdot 10^3, \text{К}^{-1}$	Pr
10	2,51	14,66	3,53	0,71
20	2,58	15,61	3,42	0,71
30	2,65	16,58	3,30	0,71
40	2,72	17,57	3,29	0,71
50	2,79	18,58	3,17	0,71
60	2,86	19,60	3,06	0,71
70	2,92	20,65	2,94	0,71
80	2,99	21,74	2,83	0,71
90	3,08	22,82	2,72	0,71
100	3,12	23,91	2,67	0,71
120	3,24	26,21	2,58	0,71

• определить значение комплекса  $Ra=GrPr$ , после чего из таблицы 3 найти значения коэффициентов  $C$  и  $n$  в расчетном уравнении  $Nu=C(GrPr)^n$  для горизонтальной гладкой трубы;

Таблица 3 – Значения коэффициента  $C$  и показателя степени  $n$  в уравнении  $Nu=C(GrPr)^n$

Значение комплекса	$C$	$n$
$Ra=Gr \cdot Pr \leq 5 \cdot 10^2$	1,18	1/8
$5 \cdot 10^2 < Ra=Gr \cdot Pr \leq 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4
$Ra=Gr \cdot Pr > 2 \cdot 10^7$	0,135	1/3

• определить значение числа Нуссельта по формуле  $Nu=C(GrPr)^n$ ;  
 • используя определение числа Нуссельта  $Nu = \alpha l / \lambda$  и полученное его численное значение, рассчитать значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ . Учесть, что в случае горизонтальной трубы  $l = d$ .

3. Сравнить значения коэффициентов теплоотдачи, полученные на основе закона Ньютона-Рихмана и метода подобия.

В выводах работы сделать заключение об источнике погрешностей и преобладающем механизме теплопереноса (конвективном или лучистом) в рассматриваемой системе.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Самопроизвольный необратимый процесс передачи теплоты в пространстве с неоднородным распределением температуры называется теплообменом или теплопередачей. Перенос теплоты представляет собой процесс обмена внутренней энергией между рассматриваемыми элементами среды или системами тел при наличии разности температур между ними.

Передача теплоты осуществляется в трех основных формах: теплопроводность, конвективный теплообмен и лучистый теплообмен.

*Теплопроводность* – процесс передачи теплоты при непосредственном соприкосновении различных тел или отдельных частиц тела, имеющих разные температуры.

*Конвекция* – процесс передачи теплоты при перемещении объемов жидкости или газа в пространстве из области с одной температурой в область с другой. При этом перенос энергии неразрывно связан с перемещением самой среды.

*Тепловое излучение* – это процесс передачи энергии путем испускания электромагнитных волн.

Тепловые процессы между телами в различных агрегатных состояниях содержат и различные формы обмена теплом. В частности, процесс теплопередачи между жидкостью или газом и поверхностью твёрдого тела при их соприкосновении называется конвективным теплообменом. Этот процесс осуществляется одновременно действием теплопроводности и конвекции.

Различают две разновидности конвективной передачи теплоты – естественную (или свободную) и вынужденную конвекцию. **Объектом изучения в данной работе является свободная конвекция**, которая вызвана только различием в плотностях нагретых и охлаждённых частей жидкости или газа в отсутствие любых внешних причин.

Процесс конвективного теплообмена между поверхностью тела и средой описывается законом Ньютона-Рихмана, который устанавливает, что количество теплоты  $Q$ , передаваемое конвективным теплообменом в единицу времени, прямо пропорционально площади поверхности твёрдого тела и разности температур его поверхности и окружающей среды  $t_0 - t_\infty$ :

$$Q = \alpha(t_0 - t_\infty)F \quad (\text{П.1})$$

или, используя понятие плотности теплового потока ( $q = Q/F$ ),

$$q = \alpha(t_0 - t_\infty), \quad (\text{П.2})$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи [Вт/(м<sup>2</sup>К)], характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой. Он учитывает все факторы, которые влияют на процесс конвективного теплообмена. Среди них:

- $w$  – скорость среды (жидкость, газ); режим движения среды (ламинарный, турбулентный);
- $\Phi$  – форма тела (плоская, цилиндрическая),  $l$  – размеры и положение его поверхности (горизонтальная, вертикальная);
- $\theta = (t_0 - t_\infty)$  – температурный напор;
- физические свойства жидкостей или газов: коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ ), изобарная удельная теплоемкость среды ( $c_p$ ), плотность ( $\rho$ ), коэффициент температуропроводности ( $a = \lambda / c_p \rho$ ), коэффициент динамической вязкости ( $\mu$ ) или кинематической вязкости ( $\nu = \mu / \rho$ ), температурный коэффициент объемного расширения ( $\beta = 1/T$ ),  $T$  – абсолютная температура

Следовательно, коэффициент теплоотдачи является функцией этих и других параметров.

$$\alpha = f_1(\Phi; l; w; \theta; \lambda; a; c_p; \rho; \nu; \beta). \quad (\text{П.3})$$



Она имеет очень сложный вид и для её определения невозможно дать общую формулу. Это значит, что каждый конкретный случай должен служить самостоятельным объектом изучения, иногда только экспериментальным методом. Наиболее простым для исследования является случай симметричных тел, в частности в форме цилиндра.

Для аналитического метода исследования конвективного теплообмена нужно решить систему дифференциальных уравнений, состоящую из уравнения энергии (закон сохранения энергии), уравнения движения (импульса), уравнения неразрывности (закон сохранения массы), уравнения теплообмена (условие теплообмена на границе твердого тела и среды). Их решение сложная и трудоемкая задача, требующая разработки специальных методов. В частности, метод подобия позволил представить решение уравнения (3) в так называемой критериальной форме, то есть в выражении функциональной зависимости друг от друга нескольких критериев:

$$Nu=f_2(\Phi; Re; Gr; Pr), \quad (\text{П.4})$$

где  $Nu=al/\lambda$  – критерий Нуссельта (безразмерный коэффициент теплоотдачи), характеризует теплообмен между поверхностью стенки и жидкостью или (газом);

$Re=wl/\nu$  – критерий Рейнольдса, характеризует соотношение сил инерции и вязкости и определяет характер течения жидкости (газа);

$Gr=(\beta g l^3 \Delta t)/\nu^2$  – критерий Грасгофа, характеризует подъёмную силу, возникающую в жидкости (газе) вследствие разности плотностей;

$Pr=\nu/a=(\mu c_p)/\lambda$  – критерий Прандтля, характеризует физические свойства жидкости (газа).

В случае свободной конвекции  $w=0$ , тогда:

$$Nu=f_2(\Phi; Gr; Pr). \quad (\text{П.5})$$

Вид этой функциональной зависимости необходимо отыскивать для каждого конкретного случая конвективного теплообмена. В частности, как установлено академиком М. А. Михеевым, свободная конвекция от горизонтальной трубы диаметром  $d$ , находящейся в неограниченном пространстве сухого воздуха, описывается уравнением:

$$Nu=C(GrPr)^n. \quad (\text{П.6})$$

Обратим внимание на то, что выражения приведенных выше критериев содержат различные характеристики среды, в которой происходит конвективный теплообмен, в том числе и коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ . Это позволяет произвести проверку выполнимости уравнения (П.6), если  $\alpha$  будет определено или прямыми измерениями, или косвенными – из некоторого другого соотношения. Таким соотношением является закон Ньютона-Рихмана (1), из которого следует, что:

$$\alpha = \frac{Q}{(t_0 - t_\infty)F}. \quad (\text{П.7})$$

Следовательно, экспериментальная установка должна содержать цилиндр, способный нагреваться и возможности для определения мощности нагревателя и температуры поверхности цилиндра.

Планируя проведение эксперимента, учтем, что один из участников конвективного теплообмена (твердое тело) является еще и источником теплового излучения с мощностью  $Q_l$ . Это значит, что мощность нагревателя цилиндра в стационарном режиме (когда температура поверхности цилиндра не изменяется со временем) расходуется и на конвекцию, и на излучение:

$$Q = Q_k + Q_l \text{ или } Q_k = Q - Q_l. \quad (\text{П.8})$$

Величина  $Q_l$  определяется уравнением Стефана-Больцмана, Вт:

$$Q_l = \varepsilon C_0 \left[ \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_\infty}{100} \right)^4 \right], \quad (\text{П.9})$$

где  $\varepsilon$  – степень черноты поверхности тела;  $C_0 = 5,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела. Второе слагаемое в уравнении (П.9) учитывает, что все тела в помещении и его стены – это тоже источники лучистой энергии. Они передают ее друг другу, в том числе и рабочему телу экспериментальной установки, а оно, в свою очередь, излучает ее в окружающее пространство. Эту долю мы и вычитаем из общего потока лучистой энергии цилиндра, так как она не связана с действием нагревателя.

### Контрольные вопросы

1. Закон Ньютона-Рихмана.
2. Какие существуют способы переноса теплоты?
3. Естественная и вынужденная конвекция.
4. Какие температуры и геометрические размеры тела принимаются за определяющие при расчете коэффициента теплоотдачи?
5. Физическая сущность чисел Нуссельта, Грасгофа, Релея и Прандля.

Учебное издание

**Составители:**

*Пинчук Александр Иванович  
Борушко Вадим Васильевич  
Клименко Николай Федорович*

# Методические указания

к лабораторной работе  
«Исследование теплопередачи при естественной конвекции  
воздуха около горизонтального цилиндра»

*по курсу «Тепломассообмен»*

для студентов специальности  
«Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана  
воздушного бассейна» (1-70 04 02)

Ответственный за выпуск: Пинчук А.И.  
Редактор: Боровикова Е.А.  
Компьютерная вёрстка: Соколюк А.П.  
Корректор: Никитчик Е.В.

---

Подписано в печать 29.11.2018 г. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага «Performer».  
Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л. 0,69. Уч. изд. л. 0,75. Заказ № 1434. Тираж экз.  
Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный  
технический университет». 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.