

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Уральский государственный лесотехнический университет»  
(УГЛТУ)

Кафедра энергетики

Ю.В. Путилин  
С.В. Звягин  
А.И. Сафронов

# **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ СВОБОДНОМ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ В НЕОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ**

Учебно-методическое руководство к лабораторной работе № 16 по курсу  
«Теплотехника» для студентов очного и заочного обучения  
всех специальностей

Екатеринбург  
2020

Печатается по рекомендации методической комиссии ИАТТС.

Протокол № 1 от 30.10.2019 г.

Рецензент – профессор, доктор техн. наук С.М. Шанчуров

Редактор Л. Д. Черных

Оператор компьютерной верстки Е. Н. Дунаева

---

Подписано в печать 20.03.2020		Поз. 44
Плоская печать	Формат 60x84 1/16	Тираж 10 экз.
Заказ №	Печ. л. 0,70	Цена руб. коп.

---

Редакционно-издательский отдел УГЛТУ  
Сектор оперативной полиграфии РИО УГЛТУ

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Процесс теплообмена при свободном движении жидкости (под жидкостью следует понимать либо газ, либо капельную жидкость) широко используется в различных отраслях промышленности. Свободным называется движение, обусловленное разностью плотностей нагретых и холодных частиц жидкости вследствие теплообмена с поверхностью. В общем случае интенсивность такого движения, а, следовательно, и теплоотдачи зависит от физических свойств жидкости, формы, размеров и положения поверхности.

Для горизонтальной трубы при свободном движении жидкости в неограниченном пространстве интенсивность теплоотдачи описывается следующим критериальным уравнением:

$$Nu_{ж,d} = 0,5 (Gr_{ж,d} \cdot Pr_{ж})^{0,25} (Pr_{ж} / Pr_{с})^{0,25}, \quad (1)$$

где  $Nu_{ж,d}$  – критерий Нуссельта;

$Gr_{ж,d}$  – критерий Грасгофа;

$Pr_{ж}$  – критерий Прандтля, определенный при температуре жидкости  $t_{ж}$ ;

$Pr_{с}$  – критерий Прандтля при температуре стенки трубы.

Для воздуха критерий Прандтля практически не изменяется и равняется 0,7, поэтому для горизонтальной трубы, охлаждаемой в воздухе, зависимость (1) принимает следующий вид:

$$Nu_{ж,d} = 0,46 \cdot Gr_{ж,d}^{0,25}. \quad (2)$$

При расчете  $Nu_{ж,d}$  и  $Gr_{ж,d}$  в качестве определяющего размера принят наружный диаметр трубы, а определяющей температуры – температура воздуха вдали от трубы.

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Экспериментально исследовать теплоотдачу при свободном движении (конвекции) воздуха;
2. Сравнить полученные экспериментальные результаты с расчетными.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Ее основными элементами являются две горизонтальные трубки разного диаметра, внутри которых размещены электрические нагреватели  $\delta$ . Изменение интенсивности нагрева трубок производится

автотрансформатором 12. Напряжение на клеммах автотрансформатора измеряется вольтметром 11. Сила тока в нагревателях определяется амперметром 10, подсоединяемым либо к одной трубке, либо к двум трубкам одновременно с помощью выключателя 9.

Изменение температуры наружной поверхности трубок  $t_c$  производится термопарами 1 ÷ 6, подключенными через переключатель 14 к потенциометру 15, который регистрирует ЭДС термопар – E. Температуры  $t_c$  находятся по градуировочному графику зависимости  $t_c = f(E)$ . Холодные спаи термопар помещаются в термостат 16, заполненный тающим льдом. Температура окружающего воздуха  $t_{ж}$  измеряется лабораторным термометром.

## **ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

Опыты проводятся одновременно на двух трубках в двух различных тепловых режимах, которые задаются преподавателем. При этом необходимо следить, чтобы воздух возле установки был в спокойном состоянии. Открытые двери и окна, резкие движения наблюдателей около трубок нарушают свободную конвекцию, что искажает результаты опытов.

Эксперименты выполняются в следующей последовательности.

1. Включить электронагреватели с помощью рубильника. Автотрансформатором установить первый тепловой режим.

2. С помощью переключателя подключить одну из термопар к потенциометру и начать измерение ЭДС этой термопары. Прекращение возрастания ЭДС свидетельствует о прогреве трубок и установлении стационарного теплового режима, когда температуры поверхности трубок не изменяются во времени.

3. После достижения стационарного режима выполнить измерения:

- a) ЭДС всех шести термопар;
- b) температуры окружающего воздуха;
- c) напряжения на клеммах трансформатора;
- d) силы тока для двух труб и для одной из них. Сила тока в нагревателе второй трубы определяется как разность полученных измерений.

Значения величин внести в табл. 1.

4. Установить второй тепловой режим и, по достижении стационарного состояния, произвести соответствующие измерения согласно п. 3.

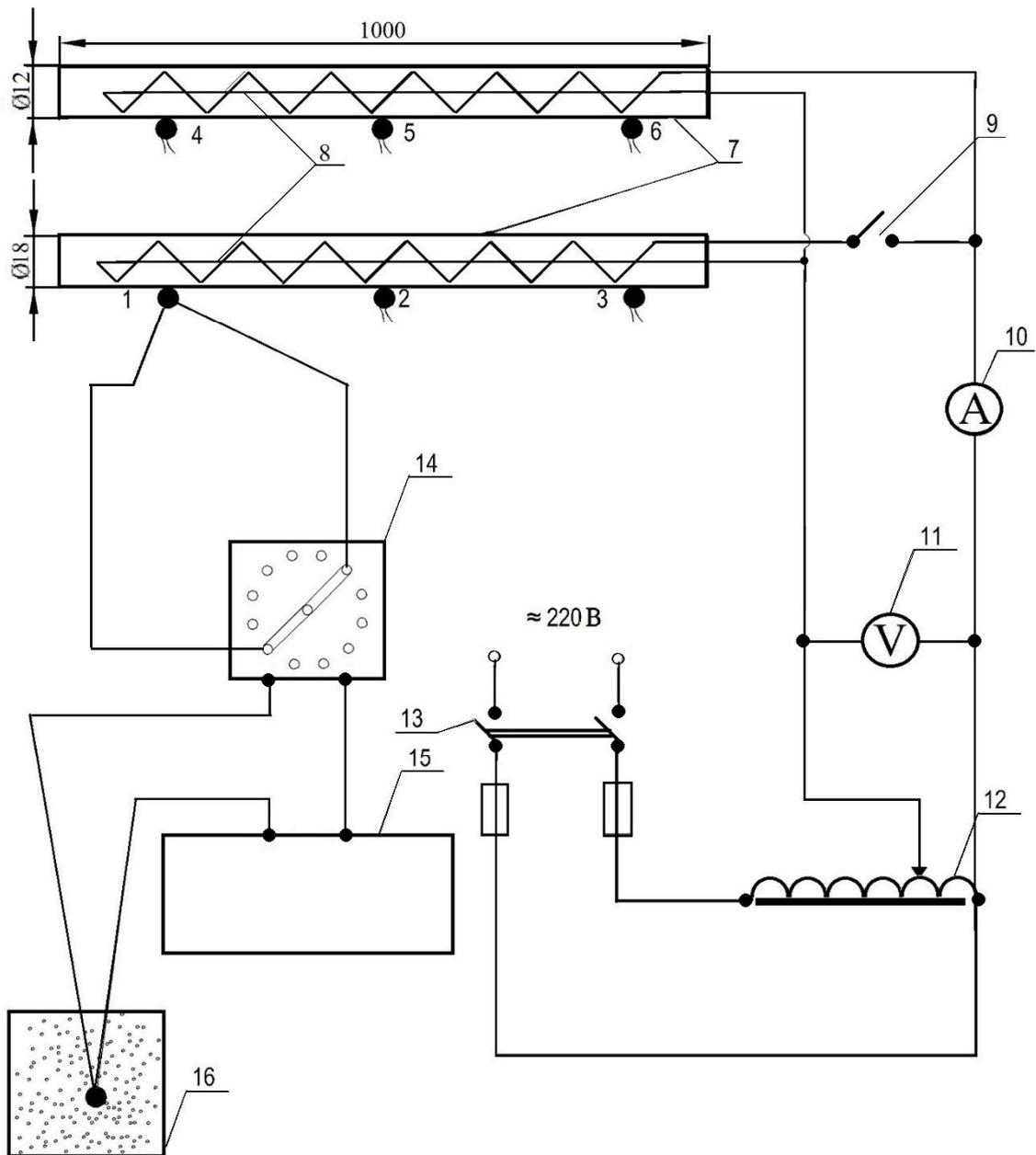


Рис.1. Схема экспериментальной установки

1...6 – термопары; 7 – экспериментальные трубки; 8 – электронагреватели трубок; 9 – выключатель; 10 – амперметр; 11 – вольтметр; 12 – автотранс-форматор; 13 – рубильник; 14 – переключатель термопар; 15 – потенциометр; 16 – термостат

По опытным данным рассчитываются критерии подобия  $Nu_{ж,d}$  и  $Gr_{ж,d}$ . Физические параметры сухого воздуха  $\nu$  и  $\lambda$  выбираются по табл. 1 при температуре воздуха  $t_{ж}$ .

Для нахождения критерия  $Nu_{ж,d}$  необходимо рассчитать коэффициент теплоотдачи свободной конвекцией  $\alpha_{к}$ , Вт/(м<sup>2</sup>· К), определяемый как разность:

$$\alpha_{к} = \alpha - \alpha_{л} . \quad (3)$$

Здесь суммарный коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup>· К), находится по формуле

$$\alpha = \frac{Q}{F(t_c - t_{ж})} , \quad (4)$$

а коэффициент теплоотдачи излучением  $\alpha_{л}$ , Вт/(м<sup>2</sup>· К), подсчитывается по уравнению:

$$\alpha_{л} = \frac{\varepsilon \cdot C_0 \left[ \left( \frac{T_c}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{ж}}{100} \right)^4 \right]}{t_c - t_{ж}} , \quad (5)$$

где  $Q$  – тепло, выделяемое нагревателем трубки, Вт,  $Q = J \cdot U$ ;

$F$  – площадь поверхности трубки, м<sup>2</sup>,  $F = \pi \cdot d \cdot L$ ;

$L$  – длина трубки, м;

$d$  – диаметр трубки, м;

$\varepsilon$  – степень черноты поверхности трубки, равная 0,22 для латуни и 0,5 – для стали;

$C_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела,  $C_0 = 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>· К<sup>4</sup>);

$T_c, T_{ж}$  – абсолютные температуры поверхности трубки и воздуха, соответственно, К ( $T_c = t_c + 273$ ;  $T_{ж} = t_{ж} + 273$ ).

Полученные расчетные данные внести в табл. 3.

По уравнению (2) построить теоретическую прямую зависимости  $\ln Nu_{ж,d} = f(\ln Gr_{ж,d})$  (рис. 2), задаваясь двумя значениями критерия Грасгофа. Рекомендуется принять  $Gr_{ж,d} = 10^3$  и  $Gr_{ж,d} = 10^5$ . На полученный график нанести опытные точки, взятые из табл. 3. Сравнить теоретические и экспериментальные данные.

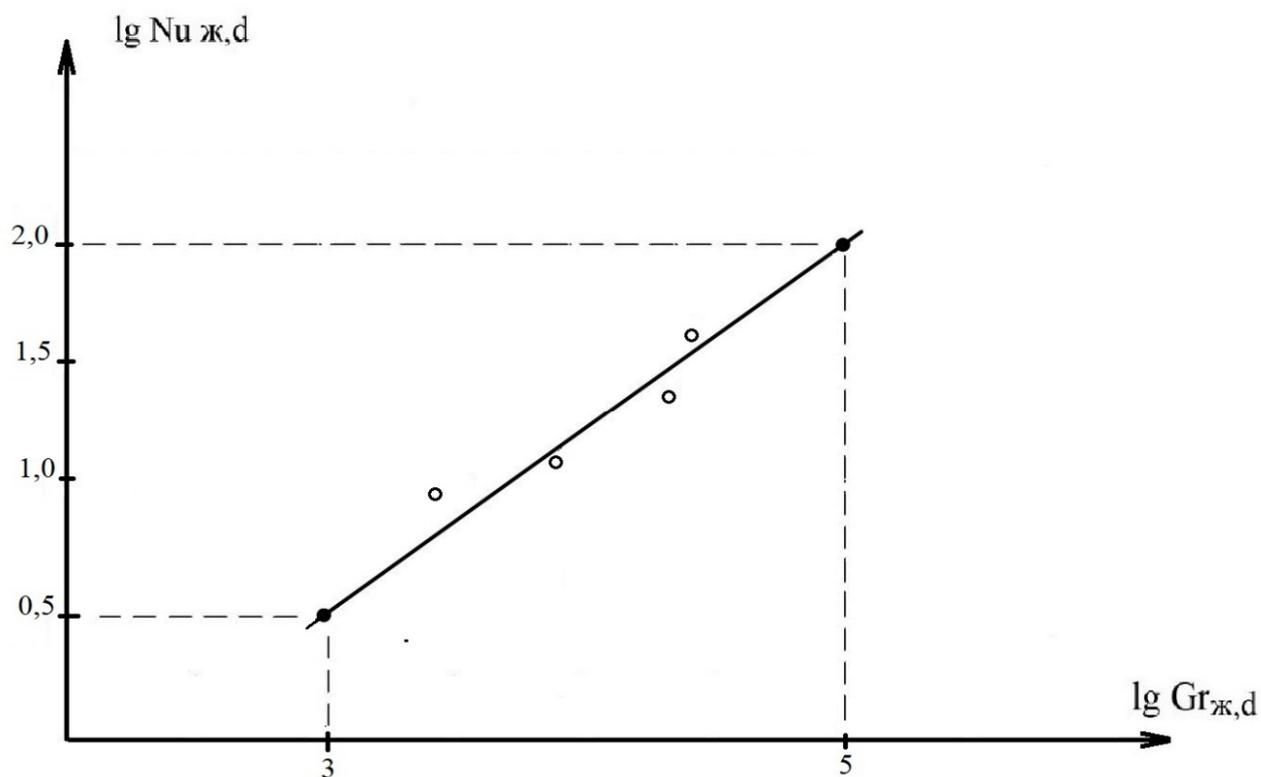


Рис. 2. Зависимость  $\lg Nu_{ж,d} = f(\lg Gr_{ж,d})$

Таблица 2

Физические параметры сухого воздуха

$t_{ж},$ °C	$\lambda \cdot 10^2,$ Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6,$ м <sup>2</sup> /с	$t_{ж},$ °C	$\lambda \cdot 10^2,$ Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6,$ м <sup>2</sup> /с
10	2,51	14,16	90	3,13	22,10
20	2,59	15,06	100	3,21	23,13
30	2,67	16,00	120	3,34	25,45
40	2,76	16,96	140	3,49	24,80
50	2,83	17,95	160	3,64	30,09
60	2,90	18,97	180	3,78	32,49
70	2,96	20,02	200	3,93	34,85
80	3,05	21,09			

## Результаты измерений

Наименование величин и размерность	1 тепловой режим	2 тепловой режим
Напряжение, U, В		
Сила тока в нагревателе, J, А: первой трубы второй трубы		
ЭДС термопар, мВ, для: первой трубы E <sub>1</sub> E <sub>2</sub> E <sub>3</sub> второй трубы E <sub>4</sub> E <sub>5</sub> E <sub>6</sub>		
Температура поверхности, °С: первой трубы t <sub>c1</sub> t <sub>c2</sub> t <sub>c3</sub> второй трубы t <sub>c4</sub> t <sub>c5</sub> t <sub>c6</sub>		
Средняя температура поверхности, °С: первой трубы $t_c = \frac{t_{c1} + t_{c2} + t_{c3}}{3}$ второй трубы $t_c = \frac{t_{c4} + t_{c5} + t_{c6}}{3}$		
Температура воздуха t <sub>ж</sub> , °С		

## Результаты обработки опытных данных

Наименование величины	1 режим		2 режим	
	1 труба	2 труба	1 труба	2 труба
Суммарный коэффициент теплоотдачи $\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)				
Коэффициент теплоотдачи излучением $\alpha_{л}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)				
Коэффициент теплоотдачи свободной конвекцией $\alpha_{к}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)				
Коэффициент кинематической вязкости воздуха $\nu$ , м <sup>2</sup> /с				
Коэффициент теплопроводности воздуха $\lambda$ , Вт/(м·К)				
Коэффициент объемного расширения воздуха $\beta = \frac{1}{T_{ж}}, \text{ } ^\circ\text{C}$				
Критерий Грасгофа $Gr_{ж,d} = \frac{9,8 \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot d^3}{\nu^2}$				
$\lg Gr_{ж,d}$				
Критерий Нуссельта $Nu_{ж,d} = \frac{\alpha_{к} \cdot d}{\lambda}$				
$\lg Nu_{ж,d}$				

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по работе должен включать следующие разделы:

1. Наименование и цель работы.
2. Принципиальная схема установки.
3. Результаты измерений (табл. 2).
4. Результаты обработки опытных данных (табл. 3).
5. График зависимости  $\lg Nu_{ж,д} = f(\lg Gr_{ж,д})$ .

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое свободная конвекция?
2. От каких величин зависит интенсивность теплоотдачи свободной конвекции?
3. По каким формулам находятся коэффициенты теплоотдачи суммарный  $\alpha$  и при свободной конвекции  $\alpha_k$  в настоящей лабораторной работе?
4. Как рассчитываются критерии подобия  $Nu_{ж,д}$  и  $Gr_{ж,д}$ ?
5. Как изменяется интенсивность теплоотдачи с увеличением температуры поверхности?



**Ю.В. Путилин**  
**С.В. Звягин**  
**А.И. Сафронов**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ  
СВОБОДНОМ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ  
В НЕОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ**

Екатеринбург  
2020