

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ГОУ ВПО «УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Кафедра энергетики

Ю.В. Путилин  
В.В. Мамаев

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА  
ПРИ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ ВНУТРИ ТРУБ  
И КАНАЛОВ**

Методические указания  
к лабораторной работе № 18  
для студентов очной и заочной форм обучения  
всех специальностей по дисциплине «Теплотехника»

Екатеринбург  
2010

Печатается по рекомендации методической комиссии ЛМФ.  
Протокол № 1 от 24.09.2009 г.

Рецензент – доцент, канд. техн. наук А.И. Сафронов

Методические указания предназначены для студентов очной и заочной форм обучения всех специальностей по дисциплине «Теплотехника». Работа выполняется в соответствии с рабочими программами по данной дисциплине и имеет целью закрепление прослушанного лекционного курса и получение практических навыков проведения экспериментальных исследований и выполнения тепловых расчетов.

В методических указаниях приведены основные теоретические положения об изучаемом процессе, описание экспериментальной установки, методики проведения опытов и обработки результатов экспериментов, контрольные вопросы, а также необходимые для расчетов справочные материалы.

Редактор Е.Л. Михайлова

Оператор Г.И. Романова

---

Подписано в печать 15.03.10.		Поз. 19
Плоская печать	Формат 60x84 1/16	Тираж 100 экз.
Заказ №	Печ. л. 0,7	Цена 4 руб. 28 коп.

---

Редакционно-издательский отдел УГЛТУ  
Отдел оперативной полиграфии УГЛТУ

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В рекуперативных теплообменных аппаратах перенос тепла от греющего теплоносителя к нагреваемому осуществляется через разделяющую их твердую стенку. Процесс теплообмена между теплоносителем и стенкой называется теплоотдачей, интенсивность которой определяется законом Ньютона-Рихмана:

$$Q = \alpha F (t_{ст} - t_{ж}), \quad (1)$$

где  $Q$  – тепловой поток, Вт;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$F$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;

$t_{ст}$  – температура стенки, °С;

$t_{ж}$  – температура жидкости, °С.

Входящая в это уравнение разность  $(t_{ст} - t_{ж})$  берется по абсолютной величине.

Коэффициент теплоотдачи характеризует интенсивность передачи тепла и показывает величину теплового потока через поверхность теплообмена площадью 1 м<sup>2</sup> при разности температур поверхности и жидкости в один градус. Его величина зависит от большого числа факторов – режима движения, скорости и теплофизических параметров жидкости, формы и размеров теплообменной поверхности. Обычно коэффициент теплоотдачи определяется опытным путем или рассчитывается по результатам обобщения экспериментальных данных, представленных в форме критериальных уравнений.

При движении жидкости внутри труб и каналов наибольшее распространение получила зависимость М.А. Михеева для расчета теплоотдачи на участке стабилизированного течения:

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} (Pr/Pr_{ст})^{0,25} \varepsilon_1, \quad (2)$$

где  $Nu = \frac{\alpha d_э}{\lambda}$  – критерий Нуссельта;

$Re = \frac{w d_э}{\nu}$  – критерий Рейнольдса;

$Pr$  – критерий Прандтля, определяемый по температуре жидкости;

$Pr_{ст}$  – критерий Прандтля, определяемый по температуре стенки;

$\alpha$  – средний коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$w$  – скорость движения жидкости, м/с;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·К);

$d_э = 4F/\Pi$  – эквивалентный диаметр трубы ( $F$  – площадь поперечного сечения,  $\Pi$  – смоченный периметр этого сечения), м;

$\varepsilon_1$  – поправка, учитывающая влияние начального участка.

Зависимость (2) справедлива для наиболее распространенного в технических устройствах турбулентного режима течения жидкости при  $Re = (10^4 - 5 \cdot 10^6)$  и  $Pr = (0,6 - 2500)$ .

Для переходного режима течения жидкости, когда  $2,3 \cdot 10^3 < Re < 10^4$  расчет производится по уравнению

$$Nu = A Pr^{0,43} \left( Pr / Pr_{ст} \right)^{0,25} \epsilon_1, \quad (3)$$

где  $A$  – величина, выбираемая из табл. 1, как среднеарифметическая при данном числе  $Re$ :

$$A = \frac{A_{max} + A_{min}}{2}. \quad (4)$$

Таблица 1

Значение коэффициента  $A$  в зависимости от числа  $Re$

$Re \cdot 10^{-3}$	2,3	2,4	2,5	3	4	5	6	7	8	9	10
$A_{max}$	10,3	10,6	11,0	12,7	16,0	19,1	22,1	25,0	27,8	30,6	33,3
$A_{min}$	3,3	3,8	4,4	7,0	10,3	15,5	19,5	22,1	27,0	29,5	33,3

Общая интенсивность теплообмена в аппарате характеризуется коэффициентом теплоотдачи  $K$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К), величина которого зависит от интенсивности всех частных процессов, входящих в понятие теплопередачи, а именно коэффициента теплоотдачи от греющего теплоносителя к стенке трубы  $\alpha_1$ , термического сопротивления стенки  $R_{ст} = \delta_{ст} / \lambda_{ст}$  и коэффициента теплоотдачи от стенки к нагретому теплоносителю  $\alpha_2$ .

Для плоской стенки коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К), рассчитывается по выражению

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (5)$$

где  $\delta_{ст}$  – толщина стенки, м;

$\lambda_{ст}$  – коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/(м·К).

Для цилиндрической стенки формула для расчета коэффициента теплопередачи имеет более сложный вид, поскольку площади внутренней и наружной поверхностей отличаются по величине. При отнесении теплового потока на внутреннюю поверхность стенки коэффициент теплопередачи определяется как  $K_1 = K_\ell / d_{вн}$ , а на наружную поверхность – как  $K_2 = K_\ell / d_{вн}$ . Входящая в эти выражения величина  $K_\ell$ , Вт/(м·К), называется линейным коэффициентом теплопередачи:

$$K_{\ell} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_{\text{вн}}} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_{\text{н}}}{d_{\text{вн}}} + \frac{1}{\alpha_2 d_{\text{н}}}}, \quad (6)$$

где  $d_{\text{н}}$  - наружный диаметр трубы, м;

$d_{\text{вн}}$  - внутренний диаметр трубы, м.

Однако для цилиндрической поверхности тонкостенных труб (при  $d_{\text{н}}/d_{\text{вн}} \leq 1,5$ ) в расчетах с достаточной точностью можно использовать зависимость (5).

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Экспериментально исследовать зависимости коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи от скорости движения теплоносителя.
2. Сопоставить полученные данные по теплоотдаче с расчетными.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема опытной установки представлена на рисунке. Её основным элементом является теплообменник 1 типа «труба в трубе». По внутренней медной трубке длиной 1,1 м и диаметром 18×1 мм проходит горячая вода из сети горячего водоснабжения. Холодная вода из водопроводной сети движется в кольцевом канале, образованном внешней поверхностью медной трубки и внутренней поверхностью наружной стальной трубы длиной 1,0 м и диаметром 38×2 мм. Расходы обоих теплоносителей регулируются запорными вентилями 2 и 3 и устанавливаются преподавателем.

Установка позволяет исследовать как прямоточную, так и противоточную схемы движения теплоносителей. В первом случае горячая и холодная вода в теплообменнике движутся в одном направлении, а во втором – во взаимно противоположном. Установка той или другой схемы движения теплоносителей производится путем изменения направления течения горячей воды с помощью пробковых кранов 5, холодная же вода подается в теплообменник в фиксированном направлении.

Объемные расходы горячей и холодной воды измеряются тахометрическими водосчетчиками 6, а температура теплоносителей на входе и выходе из аппарата – лабораторными ртутными термометрами 4.

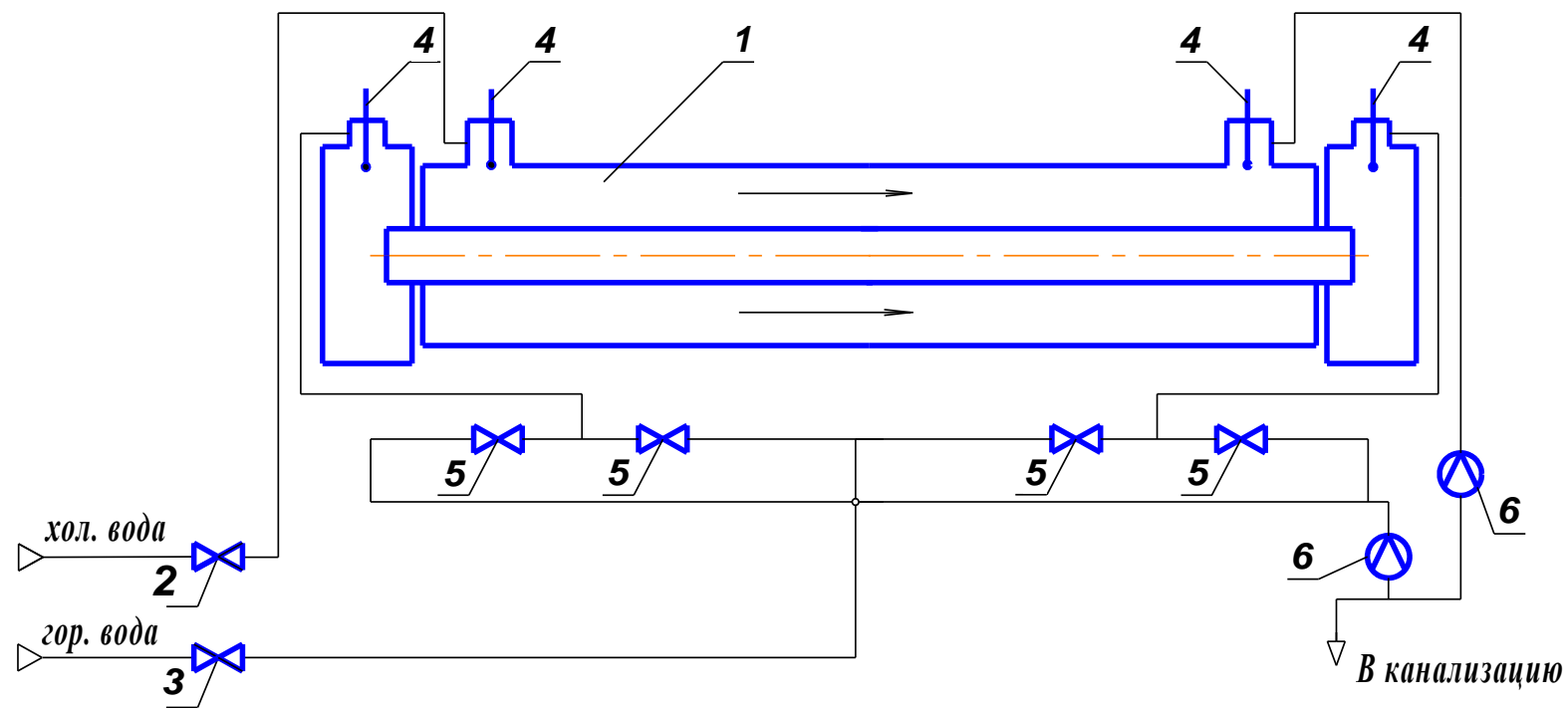


Схема экспериментальной установки:

- 1 – теплообменник типа «труба в трубе»; 2 – вентиль запорный холодной воды;  
 3 – вентиль запорный горячей воды; 4 – термометр лабораторный (4 шт.);  
 5 – кран пробковый (4 шт.); 6 – тахометрический водосчетчик (2 шт.)

## ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

Опыты проводятся в двух режимах, соответствующих двум значениям расхода каждого теплоносителя. В обоих режимах используется одна (либо противоточная, либо прямоточная) схема движения теплоносителей. Установка схемы движения производится преподавателем.

1. Открыть запорные вентили 2, 3 для подачи горячей и холодной воды в теплообменник 1. Установить первый режим.

2. Контролировать установление стационарного теплового режима, о чем свидетельствует достижение постоянных во времени значений температуры обоих теплоносителей на входе и выходе из теплообменника. Для определения этого момента записывать показания соответствующих термометров 4 с интервалом 2-3 мин.

3. При установившемся тепловом режиме выполнить измерение расходов горячей и холодной воды и температуры носителей.

3.1. Для определения расходов записать показания водосчетчика в начале ( $n_n$ ) и в конце ( $n_k$ ), времени измерения  $\tau$  (3-5 мин). Рассчитать значение расхода по выражению  $V = \frac{(n_k - n_n)}{\tau}$ , м<sup>3</sup>/с.

3.2. Измерение температур теплоносителей производится не менее 3 раз с интервалом 1-2 мин, и вычисляются среднеарифметические значения.

4. Значение измеренных величин внести в табл.2.

5. Установить второй режим и повторить опыты в соответствии с п. 2-5.

## МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Определяются теплофизические свойства горячей ( $i=1$ ) и холодной ( $i=2$ ) воды ( $\rho$ ,  $c_p$ ,  $\lambda$ ,  $\nu$ ,  $Pr$ ) по данным табл. 3 для средних температур обоих теплоносителей  $t_{жi} = (t'_i + t''_i)/2$ .

2. Вычисляются скорости движения теплоносителей, м/с:

$$w_i = V_i / f_i, \quad (7)$$

где  $V_i$  – объемный расход теплоносителя, м<sup>3</sup>/с;

$f_1 = \pi d_1^2 / 4$  – площадь поперечного сечения внутренней медной трубки ( $d_1=16$  мм), м<sup>2</sup>;

$f_2 = \frac{\pi}{4} (d_n^2 - d_{вн}^2)$  – площадь поперечного сечения кольцевого канала ( $d_n=34$  мм,  $d_{вн}=18$  мм), м<sup>2</sup>.

Таблица 2

## Результаты измерений

Наименование величины, обозначение, размерность	Значение величины	
	I режим	II режим
<b>ГОРЯЧАЯ ВОДА</b>		
Показания водосчетчика в начале отсчета $n_{1н}$ , м <sup>3</sup> в конце отсчета $n_{1к}$ , м <sup>3</sup>		
Время отсчета $\tau_1$ , с		
Объемный расход $V_1$ , м <sup>3</sup> /с		
Температура на входе $t'_1$ , °С		
Температура на выходе $t''_1$ , °С		
<b>ХОЛОДНАЯ ВОДА</b>		
Показания водосчетчика в начале отсчета $n_{2н}$ , м <sup>3</sup> в конце отсчета $n_{2к}$ , м <sup>3</sup>		
Время отсчета $\tau_2$ , с		
Объемный расход $V_2$ , м <sup>3</sup> /с		
Температура на входе $t'_2$ , °С		
Температура на выходе $t''_2$ , °С		

Таблица 3

## Физические свойства воды на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , кДж/(кг·К);	$\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	Pr
0	999,9	4,212	55,1	1,789	13,67
10	999,7	4,191	57,4	1,306	9,52
20	998,2	4,183	59,9	1,006	7,02
30	995,7	4,174	61,8	0,805	5,42
40	992,2	4,174	63,5	0,659	4,31
50	988,1	4,174	64,8	0,556	3,54
60	983,2	4,179	65,9	0,478	2,98
70	977,8	4,187	66,8	0,415	2,55
80	971,8	4,195	67,4	0,365	2,21

3. Рассчитываются значения критерия Рейнольдса:

$$Re_i = \frac{w_i d_{эi}}{\nu_i} \quad (\text{при } i=1,2). \quad (8)$$

Величины  $d$ ,  $\nu$  пояснены выше в формуле (2).



4. Вычисляются значения критерия Нуссельта ( $Nu_i$ ) для горячей и холодной воды по уравнениям (2) или (3) в зависимости от значений чисел  $Re_i$ . В условиях проведения экспериментов поправки  $(Pr/Pr_{ст})^{0,25}$  и  $\epsilon_i$  принимаются равными 1.

5. Определяются расчетные коэффициенты теплоотдачи греющего ( $i=1$ ) и нагреваемого ( $i=2$ ) теплоносителей:

$$\alpha_{ip} = \frac{Nu_i \lambda_i}{d_{\text{э}i}}. \quad (9)$$

6. Вычисляется расчетное значение коэффициента теплопередачи  $K_p$  по выражению (5), в которое подставляются определенные в п.5 значения  $\alpha_{1p}$  и  $\alpha_{2p}$ . Коэффициент теплопроводности медной трубки ( $\delta_{ст}=1$  мм) принять равным  $390 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

7. Рассчитываются массовые расходы теплоносителей, кг/с:

$$G_i = \rho_i V_i, \quad (10)$$

где  $\rho_i$  – плотность воды,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

8. Определяются значения теплового потока, кВт, переданного горячим теплоносителем ( $Q_1$ ) и полученного холодным теплоносителем ( $Q_2$ ), по выражениям:

$$Q_1 = G_1 c_{p1} (t'_1 - t''_1), \quad (11)$$

$$Q_2 = G_2 c_{p2} (t'_2 - t''_2), \quad (12)$$

в которых  $c_{p1}$ ,  $c_{p2}$  – массовые теплоемкости горячего и холодного теплоносителя при постоянном давлении,  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;

$t'_1$ ,  $t'_2$  – температура горячего и холодного теплоносителя на входе в аппарат,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t''_1$ ,  $t''_2$  – температура горячего и холодного теплоносителя на выходе из аппарата,  $^{\circ}\text{C}$ ;

Должно выполняться условие  $Q_1 \approx Q_2$  с небалансом не более 10-15% .

9. Вычисляется среднелогарифмический температурный напор в теплообменнике при принятой схеме движения теплоносителей,  $^{\circ}\text{C}$ :

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}}, \quad (13)$$

где  $\Delta t_{\text{б}}$ ,  $\Delta t_{\text{м}}$  - соответственно наибольшая и наименьшая разности температур горячего и холодного теплоносителя на концах аппарата,  $^{\circ}\text{C}$ ;

для противотока  $\Delta t_{\text{б}} = t''_1 - t'_2$ ,  $\Delta t_{\text{м}} = t'_1 - t''_2$ ;

для прямотока  $\Delta t_{\text{б}} = t'_1 - t'_2$ ,  $\Delta t_{\text{м}} = t''_1 - t''_2$ .

10. Рассчитывается экспериментальное значение коэффициента теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$K_э = \frac{Q}{F \Delta t_{ср}}, \quad (14)$$

где  $Q = (Q_1 + Q_2)/2$  - тепловой поток, Вт;

$F = \pi d_{ср} l$  - площадь поверхности теплообмена медной трубки

[  $l=1$  м,  $d_{ср}=0,5(d_{н}+d_{вн})=17$  мм ], м<sup>2</sup>.

11. Оценивается расхождение между экспериментальными и расчетными значениями коэффициента теплопередачи по выражению

$$\Delta K = \frac{(K_э - K_p)}{K_p} \cdot 100\% . \quad (15)$$

12. Результаты расчетов вносятся в табл. 4.

Таблица 4

Результаты обработки опытных данных

№ п/п	Наименование величины, обозначение, размерность	I режим		II режим	
		Горячая вода	Холодная вода	Горячая вода	Холодная вода
1	Средняя температура теплоносителя $t_{ж}$ , °С				
2	Скорость движения теплоносителя $w$ , м/с				
3	Критерий Рейнольдса $Re$				
4	Критерий Нуссельта $Nu$				
5	Коэффициент теплоотдачи $\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)				
6	Расчетный коэффициент теплопередачи $K_p$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)				
7	Массовый расход теплоносителя $G$ , кг/с				
8	Тепловой поток, кВт $Q_1$ $Q_2$				
9	Среднелогарифмический температурный напор $\Delta t_{ср}$ , °С				
10	Экспериментальный коэффициент теплопередачи $K_э$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)				
11	$\Delta K = (K_э - K_p) / K_p \cdot 100\%$				

## **СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА**

Отчет по работе должен включать:

- 1) наименование и цель работы;
- 2) принципиальную схему установки;
- 3) результаты измерений (см. табл. 2);
- 4) результаты обработки опытных данных (см. табл. 4);
- 5) вывод о влиянии скорости движения жидкости на интенсивность теплоотдачи и теплопередачи.

## **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Назовите определение понятий «теплоотдача» и «теплопередача».
2. Что характеризуют коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи?
3. Какова размерность и физический смысл коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи?
4. В какой степени коэффициент теплоотдачи при движении жидкости в трубах зависит от скорости теплоносителя и диаметра трубы?
5. Что является определяющим размером и определяющей температурой в критериальных уравнениях, описывающих теплообмен при движении жидкости в трубах и каналах.
6. Чем определяется величина коэффициента теплопередачи?
7. Что называется среднелогарифмическим температурным напором теплообменника?
8. Как определяются значения теплового потока в процессах теплообмена?

## **РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Королев, В.Н. Тепломассообмен [Текст] / В.Н. Королев, В.В. Мамаев. Екатеринбург: УГЛТА, 2000. 189 с.
2. Осипова, В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена [Текст] / В.А. Осипова. М.: Энергия, 1979. 320 с.
3. Теплотехника [Текст] / под ред. А.П. Баскакова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 224 с.