

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 26.12.2021 15:29:47  
Уникальный программный идентификатор:  
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf73e943df4a4851fda56d089

## МИНОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра управления инновациями  
Кафедра теплогазоснабжения и вентиляции

УТВЕРЖДАЮ  
Первый проректор –  
проректор по учебной работе  
Е.А.Кудряшов  
«*Локтионова*» 2012г.



### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ТЕПЛООБМЕННИКЕ ТИПА «ТРУБА В ТРУБЕ»

Методические указания к лабораторной работе по теплотехнике для  
студентов технических специальностей

Курск -2012

УДК 621.1.

Составители: И.И.Сокол, Л.Е.Кудрявцева, И.Р.Чеховский,  
В.А.Кудрявцев, Е.М.Кувардина.

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент *Г.Г.Щедрина*

**Определение коэффициента теплопередачи в теплообменнике типа «труба в трубе»:** методические указания к лабораторной работе по теплотехнике для студентов технических специальностей/ Юго-Зап. гос. ун-т.; сост.: И.И.Сокол, Л.Е. Кудрявцева, И.Р. Чеховский, В.А.Кудрявцев, Е.М.Кувардина, Курск, 2012. 13с., ил.5, табл. 4. Библиогр.: с. 13.

Излагаются методические рекомендации по опытному и теоретическому определению коэффициента теплопередачи в теплообменнике типа «труба в трубе».

Работа предназначена для студентов технических специальностей

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.  
Усл.печ.л.0,68.Уч. изд.л.0,61.Тираж экз.Заказ Бесплатно.  
Юго-Западный государственный университет.  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября

Целью работы является углубление знаний по теории теплопередачи в теплообменной аппаратуре, изучение методики экспериментального определения коэффициента теплопередачи и получение навыков в проведении экспериментальных работ.

### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Теплопередача – процесс переноса тепла от одного теплоносителя к другому через разделяющую их стенку.

Процесс теплопередачи представляет собой процесс сложного теплообмена и состоит из следующих этапов, рис.1:

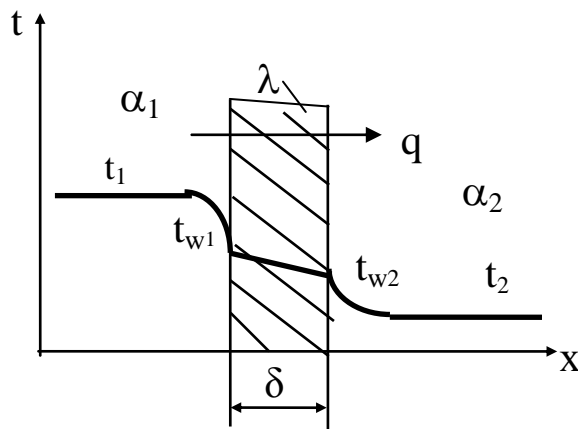


Рис.1. Распределение температур по нормали к поверхности теплопередачи

- 1) теплоотдача между горячим теплоносителем и поверхностью стенки

$$q = \alpha_1(t_1 - t_{w1}) \quad (1)$$

- 2) теплопроводность через стенку

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{w1} - t_{w2}) \quad (2)$$

- 3) теплоотдача от поверхности стенки к холодному теплоносителю

$$q = \alpha_2(t_{w2} - t_2), \quad (3)$$

где  $t_{w1}, t_{w2}$  - температура поверхности стенки, °С;

$\alpha_1, \alpha_2$  - коэффициенты теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке и от стенки к холодному теплоносителю, соответственно, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Если режим переноса тепла стационарный, то тепловой поток, передаваемый от горячего теплоносителя к холодному через разделяющую их стенку будет оставаться неизменным.

Совместное решение уравнений (1), (2) и (3) приводит к получению уравнения теплопередачи

$$Q = K \cdot \Delta t_{\text{cp}} \cdot F, \quad (4)$$

или  $q = K \cdot \Delta t_{\text{cp}}. \quad (5)$

где  $Q$  – тепловой поток, передаваемый от горячего теплоносителя к холодному, Вт;

$q$  – удельный тепловой поток (плотность теплового потока), Вт/м<sup>2</sup>;

$\Delta t_{\text{cp}}$  – средний температурный напор. Является движущей силой процесса теплопередачи. В простейшем случае он равен разности средних температур теплоносителей, т.е.

$$\Delta t_{\text{cp}} = t_1 - t_2,$$

где  $t_1, t_2$  – средняя температура горячего и холодного теплоносителей, °С;

$K$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Коэффициент теплопередачи определяет интенсивность теплопередачи. Он равен количеству тепла, передаваемого в единицу времени (с) через 1 м<sup>2</sup> поверхности стенки при разности температур между горячим и холодным теплоносителями 1°С или 1 К. Определяется по формуле

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (6)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи со стороны горячего и холодного теплоносителей, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\delta$  – толщина стенки, м;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/(м·К).

Величина, обратная коэффициенту теплопередачи, называется термическим сопротивлением теплопередачи и обозначается  $R$ , м<sup>2</sup>·К/Вт.

$$\frac{1}{K} = R = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}. \quad (7)$$

Формула (7) показывает, что общее термическое сопротивление равно сумме частных сопротивлений:  $\frac{1}{\alpha_1}$ ,  $\frac{\delta}{\lambda}$  и  $\frac{1}{\alpha_2}$ .

Если стенка не однослойная, а состоит из нескольких слоев с различной толщиной  $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n$  и с коэффициентами теплопроводности этих слоев  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ , то коэффициент теплопередачи

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (8)$$

где  $\sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$  - сумма термических сопротивлений слоев плоской стенки.

Для цилиндрической стенки уравнение теплопередачи будет иметь вид

$$Q = \pi K_\ell \Delta t_{cp} \ell, \quad (9)$$

где  $K_\ell$  – линейный коэффициент теплопередачи, Вт/(м.К);

$$K_\ell = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}},$$

$\ell$  - длина цилиндрической стенки, м;

$d_2, d_1$  – наружный и внутренний диаметры стенки, м.

На практике уравнение (9) применяют для толстостенных цилиндрических стенок, когда отношение  $d_2/d_1 > 1,4$ . Для труб с тонкими стенками  $d_2/d_1 < 1,4$  расчет можно вести по формулам для плоской стенки.

Коэффициент теплопередачи всегда меньше меньшего коэффициента теплоотдачи, поэтому для увеличения  $K$  необходимо в первую очередь увеличить меньший коэффициент теплоотдачи (или уменьшить большее термическое сопротивление).

Процесс передачи тепла от одного теплоносителя к другому осуществляется в устройствах, которые называются **теплообменными аппаратами**.

По принципу действия аппараты разделяются на рекуперативные, регенеративные и смешительные.

**Рекуперативными** называются аппараты, в которых тепло от горячего теплоносителя к холодному передается непрерывно через разделяющую их стенку. Аппараты этого типа получили широкое применение в промышленности.

**Регенеративные** теплообменники – аппараты, в которых одна и та же поверхность нагрева омывается поочередно горячим и холодным теплоносителями.

**Смешительные** теплообменники - аппараты, в которых теплопередача осуществляется при непосредственном соприкосновении и смешении горячего и холодного теплоносителей.

В теплообменных аппаратах движение жидкости осуществляется по трем основным схемам: прямоточной, противоточной и перекрестной (рис.2).

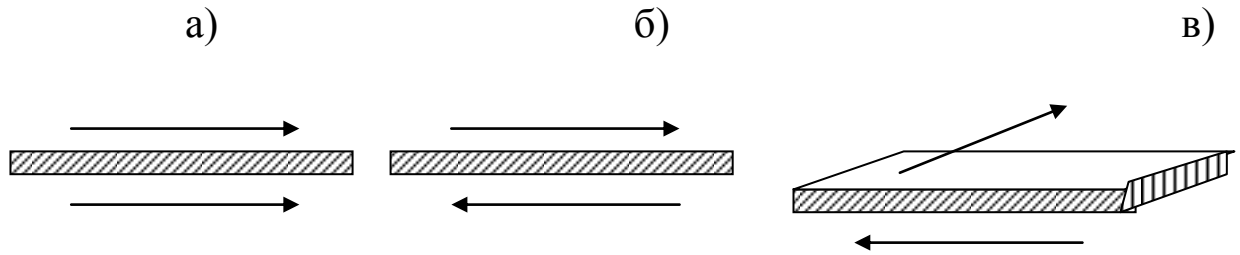


Рис.2. Схемы движения теплоносителей в теплообменниках:  
а – прямоточная; б – противоточная; в – перекрестная.

В схеме прямотока горячий и холодный теплоносители движутся параллельно в одном направлении, а в схеме противотока – в противоположных направлениях. В схеме перекрестного тока движение одного теплоносителя перпендикулярно движению другого. На практике встречаются и более сложные схемы, включающие различные комбинации основных

Основными расчетными уравнениями для теплообменных аппаратов являются: уравнение теплового баланса и уравнение теплопередачи.

### Уравнение теплового баланса

Если теплоноситель не изменяет агрегатного состояния, то уравнение теплового баланса имеет вид:

$$Q = G_1 C_1 (t_1 - t_1') = G_2 C_2 (t_2'' - t_2') \quad (10)$$

$$\text{или } Q = V_1 \rho_1 C_2 (t_1' - t_1'') = V_2 \rho_2 C_2 (t_2'' - t_2') \quad (11)$$

где  $G_1, G_2$  – массовые расходы теплоносителей, кг/с;

$V_1, V_2$  – объемные расходы теплоносителей, м<sup>3</sup>/с;

$C_1$  и  $C_2$  – средние изобарные теплоемкости теплоносителей в диапазоне температур от  $t_1'$  до  $t_2''$ , Дж/(кг·К);

$\rho_1, \rho_2$  – плотности теплоносителей, кг/м<sup>3</sup>.

При изменении агрегатного состояния одного из теплоносителей (при кипении или конденсации) уравнение теплового баланса будет иметь вид

$$Q = G_1 r_1 = G_2 C_2 (t_2'' - t_2'), \quad (12)$$

где  $r$  – скрытая теплота парообразования (конденсации) при температуре насыщения, Дж/кг.

Уравнение теплового баланса позволяет в первую очередь определить тепловой поток  $Q$ , а затем (если есть необходимость) найти один неизвестный параметр: либо расход одного из теплоносителей, либо одну из температур. Все остальные параметры должны быть известными.

### Уравнение теплопередачи

$$Q = K\Delta t_{cp}F, \quad (13)$$

где  $K$  – коэффициент теплопередачи,  $Вт/(м^2 \cdot К)$ , определяется по формуле(6);  $\Delta t_{cp}$  – средний температурный напор,  $^{\circ}С$ ;

$F$  – поверхность теплопередачи,  $м^2$

Средний температурный напор,  $\Delta t_{cp}$ , зависит от схемы движения теплоносителей, рис.3.

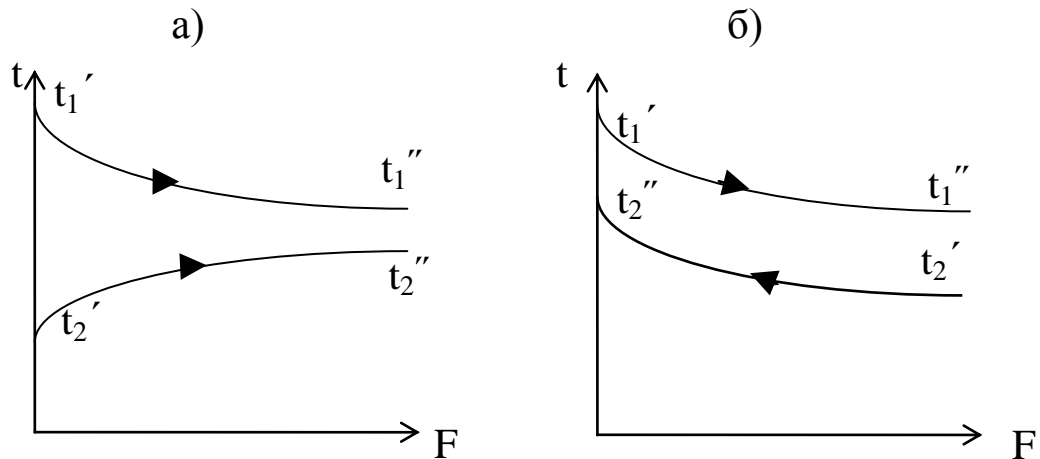


Рис.3. Изменение температур теплоносителей вдоль поверхности теплообмена при а) прямотоке и б) противотоке

Величина  $\Delta t_{cp}$  определяется через  $\Delta t_6$  – разность температур между теплоносителями на том конце аппарата, где она больше, и  $\Delta t_M$  – меньшая разность температур между теплоносителями на противоположном конце аппарата.

$$\text{Если } \frac{\Delta t_6}{\Delta t_M} < 2, \text{ то } \Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 + \Delta t_M}{2}, \quad (14)$$

$$\text{если } \frac{\Delta t_6}{\Delta t_M} > 2, \text{ то } \Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_M}}. \quad (15)$$

Средний температурный напор при противотоке при прочих равных условиях больше, чем при прямотоке.

## ЗАДАНИЕ

1. Определить экспериментальным путем коэффициент теплопередачи в теплообменнике «труба в трубе».
2. Вычислить значение коэффициента теплопередачи по критериальным уравнениям и сравнить его с опытным значением.
3. Составить отчет по выполненной работе.

### ОПИСАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ

Схема опытной установки представлена на рис.4.

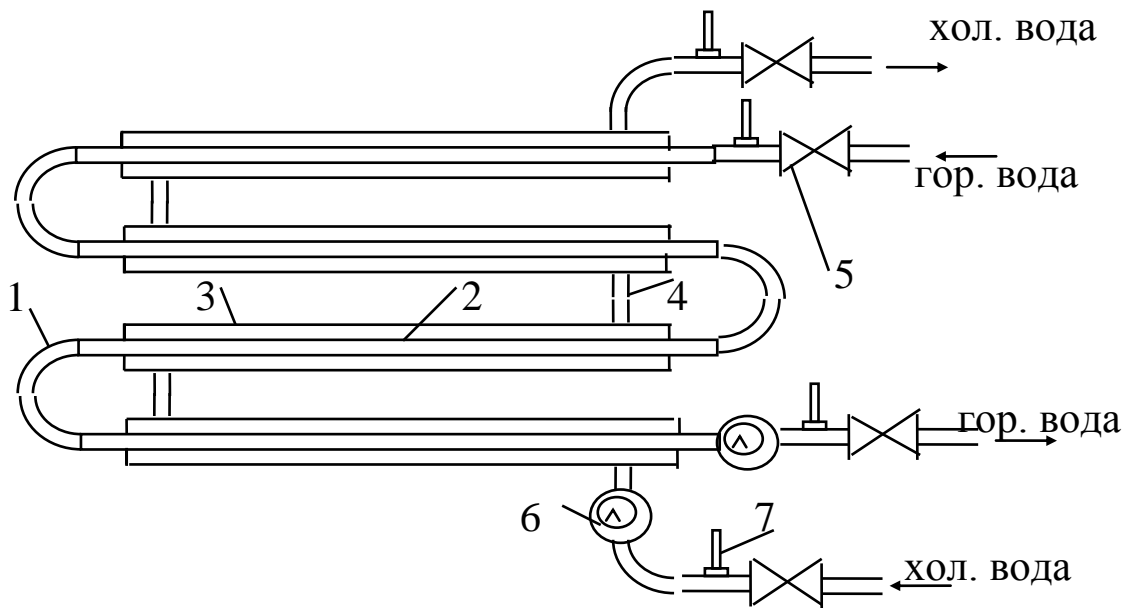


Рис.4.Схема опытной установки

Теплообменник типа «труба в трубе» собран из четырех теплообменных элементов, состоящих из внутренней 2 и наружной 3 труб. Элементы соединяются друг с другом коленом 1 и патрубками 4. Горячая вода поступает во внутреннюю трубу верхнего теплообменного элемента и по коленам 1 последовательно проходит все теплообменные элементы. Холодная вода поступает в кольцевой зазор между внутренней 2 и наружной 3 трубами нижнего теплообменного элемента и по патрубкам 4 проходит по всем теплообменным элементам. Расходы теплоносителей регулируются вентилями 5 и определяются объемным способом водяными счетчиками 6 и секундомером. Для измерения температур используются термометры 7.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

- 1) Открыть вентили подачи холодной и горячей воды.
- 2) Следить за показаниями термометров. После стабилизации температур записать показания термометров.



- 3) Измерить расходы, для чего надо засечь время прохождения заданных объемов холодной и горячей воды.
- 4) Закрыть вентили подачи холодной и горячей воды.
- 5) Результаты измерения занести в таблицу 1.

### ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

Таблица 1

#### Протокол испытаний

Параметр	Горячий т/н	Холодный т/н	Аппарат
<b>Опытные параметры</b>			
Начальная температура, °С	$t'_1 =$	$t'_2 =$	
Конечная температура, °С	$t''_1 =$	$t''_2 =$	
Средняя температура, °С	$t_1 =$	$t_2 =$	$t_w =$
Объем, м <sup>3</sup>	$V_r =$	$V_x =$	
Время, с	$\tau_1 =$	$\tau_2 =$	
<b>Расчетные параметры</b>			
Скорость, м/с	$w_1 =$	$w_2 =$	
Критерий Рейнольдса	$Re_1 =$	$Re_2 =$	
Критерий Нуссельта	$Nu_1 =$	$Nu_2 =$	
Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$\alpha_1 =$	$\alpha_2 =$	
Тепловой поток, Вт			$Q =$
Опытный коэф. теплопередачи			$K_o =$
Теоретический коэф. теплопередачи.			$K_r =$

#### Опытное определение коэффициента теплопередачи

- 1) Средние температуры горячего и холодного теплоносителей

$$t_1 = 0,5(t'_1 + t''_1) \quad t_2 = 0,5(t'_2 + t''_2).$$

- 2) Средняя температура поверхностей теплопередачи внутренней трубы  $t_w = 0,5(t_1 + t_2)$

- 3) Теплофизические свойства теплоносителей выбираются по средним температурам  $t_1$  и  $t_2$  и помещаются в табл.2; критерий  $Pr_w$  выбирается по средней температуре стенки внутренней трубы  $t_w$ .

## Теплофизические свойства воды

Теплоноси- тель	$t, ^\circ\text{C}$	$C$ Дж/(кг·К)	$\rho$ кг/м <sup>3</sup>	$\nu$ , м <sup>2</sup> /с	$\lambda$ Вт/(м·К)	$\beta$ , 1/К	Pr
Горячая вода	$t_1$						
Холодная во- да	$t_2$						
	$t_w$	-	-	-	-	-	Pr <sub>w</sub>

4) Поверхность теплопередачи  $F=4\pi d_{cp}L$ , м<sup>2</sup>,  
 где  $L=0,935$  м – длина одного элемента;  $d_{cp}=0,5(d_b+d_n)$  м – средний диаметр внутренней трубы;  $d_b=0,028$  м,  $d_n=0,032$  м – внутренний и наружный диаметры внутренней трубы.

5) Средняя разность температур,  $\Delta t_{cp}$ , рис.5.

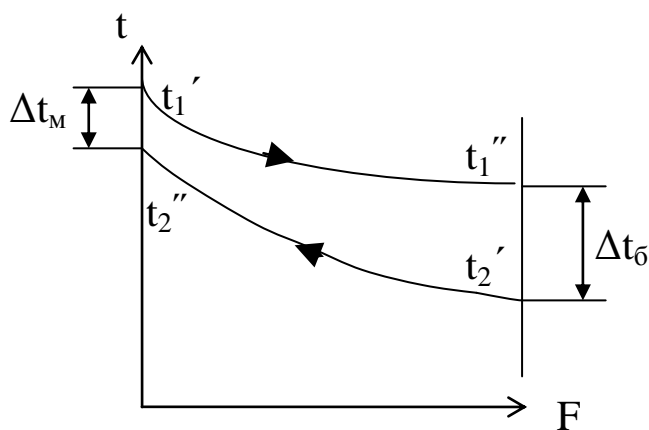


Рис.5. Схема распределения температур вдоль поверхности теплообмена при противотоке

$\Delta t_{cp} = 0,5(\Delta t_b + \Delta t_m)$  при  $\Delta t_b / \Delta t_m < 2$ ,

или  $\Delta t_{cp} = (\Delta t_b - \Delta t_m) / \ln(\Delta t_b / \Delta t_m)$  при  $\Delta t_b / \Delta t_m > 2$ ,

где  $\Delta t_b$  - большая разность температур между теплоносителями на одном конце аппарата;

$\Delta t_m$  – меньшая разность температур между теплоносителями на другом конце аппарата.

б) Тепловая нагрузка аппарата,  $Q$ .

Так как при работе аппарата он не успевает выйти на стационарный режим, то теплота горячей и холодной воды не одинакова (тепловой баланс не сходится).

$$Q = (V_1 \rho_1 c_1 (t'_1 - t''_1) + V_2 \rho_2 c_2 (t''_2 - t'_2)) / 2 \text{ Вт},$$

где  $V_1, V_2$  - объемные расходы, м<sup>3</sup>/с,  $V_1 = V_r / \tau_1$ ,  $V_2 = V_x / \tau_2$ ;

$\rho_1, \rho_2$  - плотности, кг/м<sup>3</sup>;

$c_1, c_2$  – теплоемкости, Дж/(кг.К).

7) Опытный коэффициент теплопередачи

$$K_o = Q / F \Delta t_{cp}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

### Теоретическое определение коэффициента теплопередачи

1) Скорости движения горячей и холодной воды

$$w_1 = \frac{4 \cdot V_1}{\pi d_B^2}, \quad w_2 = \frac{4 \cdot V_2}{\pi (D^2 - d_H^2)},$$

где  $w_1, w_2$  – скорости горячей и холодной воды, м/с;

$D$  – внутренний диаметр наружной трубы, м,  $D = 0,068$  м.

2) Критерии Рейнольдса для теплоносителей

$$Re_1 = \frac{w_1 d_g}{\nu_1}; \quad Re_2 = \frac{w_2 d_g}{\nu_2},$$

где  $d_g$  – эквивалентный диаметр потока для холодной воды, м,  $d_g = D - d_H$ ;

$\nu_1, \nu_2$  – кинематическая вязкость горячей и холодной воды, м<sup>2</sup>/с.

3) Критерий Нуссельта находится для каждого теплоносителя по одному из критериальных уравнений:

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} (Pr/Pr_w)^{0,25} \varepsilon_\ell \varepsilon_R \text{ при } Re > 10000;$$

$$Nu = Ko \cdot Pr^{0,43} \varepsilon_\ell \varepsilon_R \text{ при } Re = 2300 \div 10000;$$

$$Nu = 0,15 Re^{0,33} Pr^{0,43} Gr^{0,1} ((Pr/Pr_w)^{0,25} \varepsilon_\ell \varepsilon_R \text{ при } Re < 2300,$$

где  $\varepsilon_R$  – поправочный коэффициент на кривизну трубы: для холодной воды  $\varepsilon_R = 1$ , для горячей воды  $\varepsilon_R = 1 + 1,77 d_g / R$  ( $R$  – радиус кривизны колена внутренней трубы);

$\varepsilon_\ell$  – поправочный коэффициент на длину трубы: для холодной воды  $\varepsilon_\ell = 1$ , для горячей воды  $\varepsilon_\ell$  выбирается по табл.3.

Таблица 3

Значение коэффициента  $\varepsilon_\ell$ 

L/d	$\varepsilon_\ell$		
	Re ≤ 2300	Re = 10000	Re = 10 <sup>5</sup>
10	1,28	1,18	1,10
15	1,18	1,13	1,08
20	1,13	1,10	1,06

$K_o$  – коэффициент, зависит от величины критерия Рейнольдса и находится по табл.4.

Таблица 4

Значение множителя  $K_o$ 

Re	2100	2200	2300	2400	2500	3000	4000	5000	6000	8000	10000
$K_o$	1.90	2.20	3.3.	3.90	4.40	6.00	10.3	15.5	19.5	27.0	33.3

4) Коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_1 = Nu_1 \lambda_1 / d_B$ ,  $\alpha_2 = Nu_2 \lambda_2 / d_3$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К).

5) Теоретический коэффициент теплопередачи

$$K_T = 1 / (1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2 + R_3),$$

где  $\lambda = 46$  Вт/(м·К) – коэффициент теплопроводности стали;

$\delta = 0,002$  м – толщина стенки внутренней трубы;

$R_3 = 0,0015$  м<sup>2</sup>·К/Вт – термическое сопротивление загрязнений.

Полученное значение коэффициента теплопередачи  $K_T$  сравнить с опытным значением,  $K_o$ .

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Классификация теплообменных аппаратов.
2. Уравнение теплового баланса. Уравнение теплопередачи.
3. Коэффициент теплопередачи. Физический смысл, формула.
4. Схемы движения теплоносителей в теплообменных аппаратах и схемы распределения температур теплоносителей вдоль поверхности теплообмена.
7. Средняя разность температур,  $\Delta t_{cp}$ .
8. Критериальные уравнения конвективного теплообмена, их выбор.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теплотехнические измерения и приборы /Г.И.Иванова, Н.Д.Кузнецов, В.С.Чистяков. – М.: МЭИ, 2005. 450с.
2. Теплотехника: Учеб.для вузов/А.П.Баскаков, Б.В.Берг, О.К.Витт и др.; Под ред. А.П.Баскакова.-М.:ООО «ИД “Бастет”», 2010.-328с.
3. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под общ. ред В.М.Зорина: М.: Энергоатомиздат, 1988, 560 с.
- 4.Теплопередача: Учебник для вузов/ В.П. Исаченко, В.П. Осипова, А.С.Сукомел.-4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоиздат, 1981.-416с.