

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Ивановский государственный энергетический  
университет имени В.И.Ленина»

Кафедра теоретических основ теплотехники

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ  
В РЕКУПЕРАТИВНОМ ТЕПЛООБМЕННОМ  
АППАРАТЕ**

*Методические указания  
к выполнению лабораторной работы*

Иваново 2008

Составители: В.В. БУХМИРОВ

Т.Е. СОЗИНОВА

Редактор Д.В. РАКУТИНА

Методические указания содержат описание экспериментальной установки, методику проведения эксперимента, а также расчетные формулы, необходимые для обработки результатов опыта. Предназначены для студентов, обучающихся по специальностям теплотехнического профиля 140101, 140103, 140104, 140106 и 220301 и изучающих курс «Тепломассообмен» или «Теплотехника».

Утверждены цикловой методической комиссией ТЭФ

Рецензент

кафедра теоретических основ теплотехники ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина»

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В РЕКУПЕРАТИВНОМ ТЕПЛООБМЕННОМ АППАРАТЕ**

*Методические указания к выполнению лабораторной работы*

Составители: БУХМИРОВ Вячеслав Викторович

СОЗИНОВА Татьяна Евгеньевна

Редактор Т.В. Соловьева

Лицензия ИД № 05285 от 4 июля 2001 г.

Подписано в печать .

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

Печать плоская. Усл.печ.л. 1,5. Тираж 250 экз. Заказ № .

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»

Отпечатано в РИО ИГЭУ

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

## 1. Задание

1. Экспериментально найти коэффициент теплопередачи в рекуперативном теплообменном аппарате типа «труба в трубе».

2. Рассчитать коэффициент теплопередачи, используя критериальные формулы для определения коэффициентов теплоотдачи от теплоносителей к стенкам теплообменного аппарата.

3. Сравнить экспериментальное и расчетное значения коэффициента теплопередачи в теплообменнике типа «труба в трубе».

## 2. Основы теории

Для теплового расчета рекуперативного теплообменника используют следующие основные уравнения:

а) уравнение теплового баланса

$$Q_1 = Q_2 + Q_{\text{пот}}, \quad (1)$$

которое в развернутом виде для однофазных теплоносителей без учета тепловых потерь ( $Q_{\text{пот}} = 0$ ) принимает вид

$$Q = G_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_1' - T_1'') = G_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_2'' - T_2'); \quad (2)$$

б) уравнение теплопередачи

$$Q = k \cdot \overline{\Delta T} \cdot F. \quad (3)$$

В формулах (1) ÷ (3):  $Q_1$  – количество теплоты, отдаваемое горячим теплоносителем в единицу времени, Вт;  $Q_2$  – количество теплоты, получаемое холодным теплоносителем в единицу времени, Вт;  $Q_{\text{пот}}$  – потери теплоты в окружающую среду, Вт;  $G_1$  и  $G_2$  – массовые расходы горячего и холодного теплоносителей, кг/с;  $c_{p1}$  и  $c_{p2}$  – массовые изо-

барные теплоемкости горячего и холодного теплоносителей, Дж/(кг·К);  $T_1'$  и  $T_1''$  – температуры горячего теплоносителя на входе и выходе из теплообменника, °С;  $T_2'$  и  $T_2''$  – температуры холодного теплоносителя на входе и выходе из теплообменника, °С;  $k$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\overline{\Delta T}$  – средняя разность температур между горячим и холодным теплоносителями (средний температурный напор), °С;  $F$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>.

Расходы теплоносителей рассчитывают по уравнению неразрывности:

$$G = \rho \cdot \overline{w} \cdot f, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>;  $\overline{w}$  – средняя скорость теплоносителя, м/с;  $f$  – площадь поперечного сечения канала для прохода теплоносителя, м<sup>2</sup>.

Площадь поперечного сечения канала рассчитывают по формулам:

— круглая одиночная труба с внутренним диаметром  $d_{\text{вн}}$

$$f = \frac{\pi \cdot d_{\text{вн}}^2}{4}; \quad (5)$$

— кольцевой канал теплообменника типа «труба в трубе»

$$f = \frac{\pi \cdot D_{\text{вн}}^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_{\text{нар}}^2}{4}, \quad (6)$$

где  $D_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр наружной трубы, м;  $d_{\text{нар}}$  – наружный диаметр внутренней трубы, м.

Плотность и удельную теплоемкость теплоносителя находят по справочным таблицам [2] при средней температуре теплоносителя:

$$T = \frac{T' + T''}{2}, \quad (7)$$

где  $T'$  и  $T''$  – температуры теплоносителя на входе и выходе из теплообменного аппарата, °С.

Уравнение теплового баланса для однофазных теплоносителей (2) можно записать в виде

$$W_1 \cdot \delta T_1 = W_2 \cdot \delta T_2 \text{ или } \delta T_2 / \delta T_1 = W_1 / W_2, \quad (8)$$

где  $W_1 = G_1 \cdot c_{p1}$  и  $W_2 = G_2 \cdot c_{p2}$  – расходные теплоемкости (водяные эквиваленты) горячего и холодного теплоносителей, Вт/К;  $\delta T_1 = T_1' - T_1''$  и  $\delta T_2 = T_2'' - T_2'$  – изменение температур горячего и холодного теплоносителей в теплообменном аппарате, °С.

Температура теплоносителей вдоль поверхности теплообмена изменяется по экспоненциальному закону. При этом из соотношений (8) следует обратная пропорциональная зависимость между водяными эквивалентами и изменениями температуры теплоносителей вдоль поверхности теплообмена (см. рис. 1 и рис. 2):

если  $W_1 > W_2$ , то  $\delta T_1 < \delta T_2$ ;

если  $W_1 < W_2$ , то  $\delta T_1 > \delta T_2$ .

При противоточной схеме движения теплоносителей (рис. 2) выпуклость кривых изменения температуры теплоносителей направлена в сторону большего водяного эквивалента, т.е. в сторону теплоносителя с меньшим изменением температуры.

Среднюю разность температур для прямоточной и противоточной схем движения теплоносителей рассчитывают по формулам:

$$\overline{\Delta T_a} = \frac{\Delta T_{\max} + \Delta T_{\min}}{2}, \text{ если } \Delta T_{\max} / \Delta T_{\min} \leq 2; \quad (9)$$

или

$$\overline{\Delta T_l} = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}}, \text{ если } \Delta T_{\max} / \Delta T_{\min} > 2, \quad (10)$$

где  $\Delta T_{\max}$  и  $\Delta T_{\min}$  – максимальная и минимальная разности температур теплоносителей (см. рис.1 и рис.2), °С;  $\Delta T_a$  – среднеарифметическая разность температур, °С;  $\Delta T_l$  – среднелогарифмическая разность температур, °С.

У теплообменного аппарата, установленного на лабораторном стенде, для внутренней трубы выполняется условие  $d_{\text{нар}}/d_{\text{вн}} < 2$ , поэтому коэффициент теплопередачи рассчитывают по формуле теплопередачи через плоскую стенку:

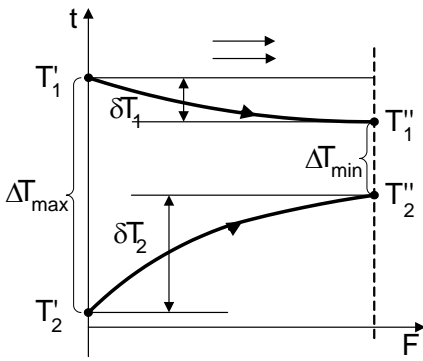
$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (11)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\delta$  – толщина стенки, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/(м·К);  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи от стенки к холодному теплоносителю, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

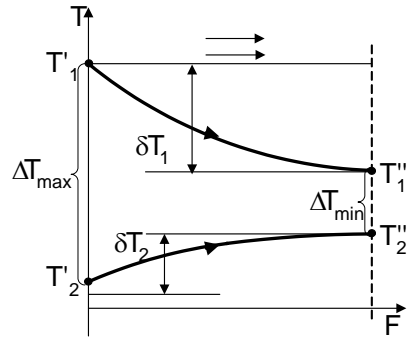
Коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  рассчитывают по критериальным формулам для вынужденного движения флюида в трубах и каналах [1]. При движении жидкостей и газов в трубах и каналах форма критериального уравнения зависит от режима движения жидкости. В общем случае критериальное уравнение, имеет вид

$$\text{Nu} = f(\text{Gr}, \text{Re}, \text{Pr} \dots), \quad (12)$$

где Nu, Gr, Re, Pr – критерии подобия.

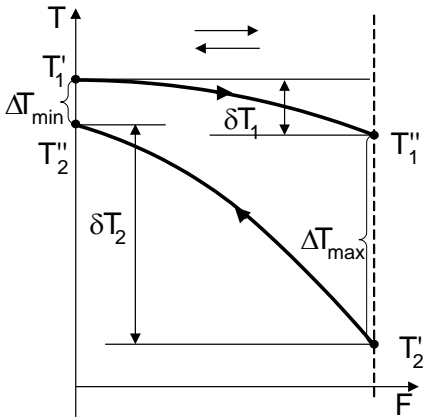


а)  $W_1 > W_2$

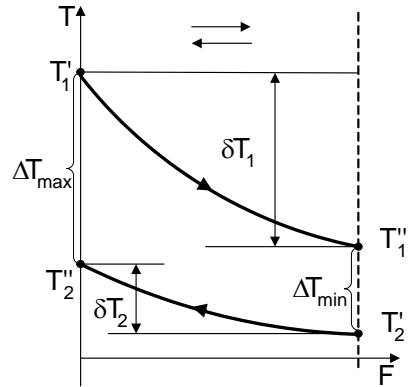


б)  $W_1 < W_2$

Рис. 1. Изменение температур горячего и холодного теплоносителей вдоль поверхности теплообмена при прямоточной схеме движения в зависимости от соотношения их водяных эквивалентов



а)  $W_1 > W_2$



б)  $W_1 < W_2$

Рис. 2. Изменение температуры горячего и холодного теплоносителей вдоль поверхности теплообмена при противоточной схеме движения в зависимости от соотношения их водяных эквивалентов

### Критерий Нуссельта

$$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot R_0}{\lambda}, \quad (13)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $R_0$  – определяющий (характерный) размер, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности текучей среды, Вт/(м·К).

### Критерий Грасгофа

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot R_0^3}{\nu^2} \beta \cdot \Delta T, \quad (14)$$

где  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости текучей среды, м<sup>2</sup>/с;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения флюида, 1/К;  $\Delta T$  – модуль разности температур между стенкой и флюидом, °С.

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

$$\beta = \frac{1}{T_0}, \quad (15)$$

где  $T_0$  – определяющая температура флюида, К.

### Критерий Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{w_0 \cdot R_0}{\nu}, \quad (16)$$

где  $w_0$  – определяющая (характерная) скорость, м/с;  $R_0$  – определяющий (характерный) размер, м.



### Критерий Прандтля

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a}, \quad (17)$$

где  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости текучей среды,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $a$  – коэффициент температуропроводности флюида,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

При движении жидкостей и газов в трубах и каналах существуют ламинарный ( $\text{Re}_{f,d} \leq 2300$ ), турбулентный ( $\text{Re}_{f,d} \geq 10^4$ ) и переходный от ламинарного к турбулентному ( $2300 < \text{Re}_{f,d} < 10^4$ ) режимы течения флюида.

Средний коэффициент теплоотдачи при ламинарном вязкостно-гравитационном режиме течения ( $\text{Re}_{f,d} \leq 2300$ ) может быть рассчитан по критериальному уравнению, полученному М. А. Михеевым:

$$\overline{\text{Nu}}_{f,d} = 0,15 \cdot \text{Re}_{f,d}^{0,33} \cdot \text{Pr}_f^{0,33} \cdot (\text{Gr}_{f,d} \cdot \text{Pr}_f)^{0,1} \cdot \varepsilon_t \cdot \overline{\varepsilon}_\ell. \quad (18)$$

Поправочный коэффициент  $\overline{\varepsilon}_\ell$ , учитывающий влияние на теплоотдачу гидродинамической стабилизации потока на начальном участке теплообмена, равен:

при  $\ell/d < 50$  значение  $\overline{\varepsilon}_\ell$  находят по данным табл. 1;

при  $\ell/d \geq 50$  —  $\overline{\varepsilon}_\ell = 1$ .

Таблица 1

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

$\ell/d$	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

Средний коэффициент теплоотдачи при турбулентном течении флюида ( $Re_{f,d} \geq 10^4$ ) в прямых гладких трубах рассчитывают по формуле М. А. Михеева:

$$\overline{Nu}_{f,d} = 0,021 \cdot Re_{f,d}^{0,8} \cdot Pr_f^{0,43} \cdot \varepsilon_t \cdot \overline{\varepsilon}_\ell \quad (19)$$

Поправочный коэффициент  $\overline{\varepsilon}_\ell$ , учитывающий влияние на теплоотдачу гидродинамической стабилизации потока на начальном участке теплообмена, равен:

при  $\ell/d < 50$  —  $\overline{\varepsilon}_\ell \approx 1 + 2d/\ell$  ;

при  $\ell/d \geq 50$  —  $\overline{\varepsilon}_\ell = 1$ .

Переходный режим течения ( $2300 < Re_{f,d} < 10^4$ ) характеризуется перемежаемостью ламинарного и турбулентного течений. В этом случае коэффициент теплоотдачи можно рассчитать по формуле:

$$\overline{Nu}_{f,d} = K_0 \cdot Pr_{f,d}^{0,43} \cdot \varepsilon_t \cdot \overline{\varepsilon}_\ell \quad (20)$$

где комплекс  $K_0$  зависит от числа Рейнольдса (табл. 2), а поправку  $\overline{\varepsilon}_\ell$  рассчитывают так же, как и при турбулентном режиме течения флюида.

Таблица 2  
Зависимость комплекса  $K_0$  от числа Рейнольдса

$Re \cdot 10^{-3}$	2,2	2,3	2,5	3,0	3,5	4,0	5	6	7	8	9	10
$K_0$	2,2	3,6	4,9	7,5	10	12,2	16,5	20	24	27	30	33

Поправку  $\varepsilon_t$  в формулах (18), (19) и (20), учитывающую изменение физических свойств среды в зависимости от температуры, рассчитывают по формуле

$$\varepsilon_t = \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}, \quad (21)$$

где критерий Прандтля  $Pr_f$  принимают по справочным данным для текучей среды при средней температуре флюида, а критерий Прандтля  $Pr_w$  принимают по справочным данным для текучей среды при температуре стенки.

Определяющие параметры для расчета критериев в формулах (18), (19) и (20):

— определяющая (характерная) температура – средняя температура воды в трубе или кольцевом канале

$$T_0 = \bar{T}_f = 0,5 \cdot (T_f' + T_f''); \quad (22)$$

— определяющий (характерный) размер для внутренней трубы – внутренний диаметр трубы

$$R_0 = d_{\text{вн}}; \quad (23)$$

— определяющий (характерный) размер для кольцевого канала – эквивалентный или гидравлический диаметр

$$R_0 = d_{\text{эkv}} = D_{\text{вн}} - d_{\text{нар}}; \quad (24)$$

— определяющая (характерная) скорость – средняя по сечению трубы скорость движения флюида

$$w_0 = G / (\rho \cdot f), \quad (25)$$

где  $T_f'$  и  $T_f''$  – температура холодной и горячей воды на входе и выходе из теплообменника, °С;  $D_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр наружной трубы, м;  $d_{\text{нар}}$  – наружный диаметр внутренней трубы, м.

### 3. Экспериментальная установка

Внешний вид экспериментальной установки и принципиальная схема её рабочего участка показаны на рис. 3 и рис. 4.

Состав установки:

- 1 – теплообменный аппарат типа «труба в трубе»;
- 2 – водоподогреватель;
- 3 – насос водоподогревателя;
- 4 – расширительный бачок водоподогревателя;
- 5 – вентиль регулирования расхода горячей воды;
- 6 – холодильник для охлаждения воды;
- 7 – насос холодильника;
- 8 – расширительный бачок холодильника;
- 9 – счетчик горячей воды;
- 10 – счетчик холодной воды;
- 11 – вентилятор холодильника;
- 12 – вентиль, регулирующий направление движения холодной воды – К1;
- 13 – вентиль, регулирующий направление движения холодной воды – К2;
- 14 – вентиль, регулирующий направление движения и расход холодной воды при прямотоке – К3;
- 15 – вентиль, регулирующий направление движения и расход холодной воды при противотоке – К4;
- 16 – тумблер «Сеть»;
- 17 – тумблер «Насос холодильника»;
- 18 – тумблер «Вентилятор холодильника»;
- 19 – тумблер «Насос нагревателя»;
- 20 – тумблер «Нагреватель»;
- 21 – измеритель температуры;
- 22 – тумблер включения измерителя температур;
- 23 – тумблер переключения термодатчиков.

В лабораторной работе изучают процесс теплопередачи в рекуперативном водо-водяном теплообменном аппарате типа «труба в трубе». Горячая вода движется по внутренней трубке размерами  $d_{\text{вн}}/d_{\text{нар}} = 13/15$  мм. Холодная вода движется по кольцевому каналу межтрубного пространства теплообменного аппарата. Размеры наружной трубки  $D_{\text{вн}}/D_{\text{нар}} = 23/25$  мм. Длина рабочего участка теплообменника  $\ell = 1$  м.

Горячая вода нагревается в водоподогревателе 2 и движется по замкнутому контуру (водоподгреватель – теплообменник – водоподгреватель) под действием насоса 3.

Для регулирования расхода горячей воды на входе в водоподогреватель 2 установлен вентиль 5. Расход горячей воды определяют по счетчику 9, установленному перед теплообменником.

Холодная вода также движется по замкнутому контуру (холодильник – теплообменник – холодильник) под действием насоса 7. В теплообменном аппарате холодная вода получает теплоту от горячей воды и нагревается. Для охлаждения нагретой воды применен холодильник 6, в качестве которого использован автомобильный радиатор. Радиатор постоянно обдувается вентилятором 11.

Расход холодной воды определяют по счетчику 10, установленному перед теплообменным аппаратом. Изменить расход холодной воды можно с помощью вентиля 14 (К3) при прямоточном движении теплоносителей или вентилем 15 (К4) при противоточном движении теплоносителей.

Движение горячей воды организовано всегда в одном направлении (слева направо). Движение холодной воды с помощью вентиля 12, 13, 14, 15 можно организовать в двух направлениях:

- слева направо при прямотоке;
- справа налево при противотоке.

В теплообменном аппарате измеряют температуры на входе и выходе горячего и холодного теплоносителей. В качестве датчиков температуры использованы термопары. Все термопары через тумблер 23 подключены к измерителю температур 21 в определенной последовательности:

$T_1$  – температура горячего теплоносителя на входе в теплообменный аппарат ( $T_1'$ );

$T_2$  – температура горячего теплоносителя на выходе из теплообменного аппарата ( $T_1''$ );

$T_3$  – температура холодного теплоносителя на входе в теплообменный аппарат (при прямотоке –  $T_2'$ ) или температура холодного теплоносителя на выходе из теплообменного аппарата (при противотоке —  $T_2''$ );

$T_4$  – температура холодного теплоносителя на выходе из теплообменного аппарата (при прямотоке —  $T_2''$ ) или температура холодного теплоносителя на входе в теплообменный аппарат (при противотоке —  $T_2'$ ).

#### **4. Порядок проведения эксперимента**

*Внимание! Экспериментальную установку включает и выключает инженер или преподаватель.*

1. Изучить устройство экспериментальной установки и подготовить журнал наблюдений.

2. О готовности к проведению эксперимента сообщить преподавателю.

3. Включить питание установки тумблером 16 «Сеть».

4. Включить насос подачи горячей воды 3 тумблером 19 «Насос нагревателя».

5. По указанию преподавателя установить порядок движения теплоносителей (прямоток или противоток).

При прямотоке вентили 12 (К1) и 15 (К4) необходимо закрыть, а вентили 13 (К2) и 14 (К3) — открыть.

При противотоке вентили 13 (К2) и 14 (К3) необходимо закрыть, а вентили 12 (К1) и 15 (К4) — открыть.

6. Включить насос подачи холодной воды 7 тумблером 17 «Насос холодильника».

7. Определить объемный расход горячей воды, фиксируя два показания счетчика горячей воды 9 вначале и в конце заданного промежутка времени.

Показания счетчика 9 и секундомера внести в журнал наблюдений.

8. Определить объемный расход холодной воды, фиксируя два показания счетчика холодной воды 10 вначале и в конце заданного промежутка времени. Показания счетчика 10 и секундомера внести в журнал наблюдений.

9. Включить измеритель температуры 21 тумблером 22.

10. Включить водоподогреватель 2 тумблером 20 «Нагреватель».

11. Включить вентилятор холодильника 11 тумблером 18 «Вентилятор холодильника».

12. Определить температуры по измерителю температур 21 с помощью переключателя терморпар 23.

Показания температур внести в журнал наблюдений.

13. Фиксировать значения температур каждые 5÷10 минут.

14. Проводить эксперимент до достижения стационарного режима.

15. Об окончании проведения эксперимента доложить преподавателю или инженеру.

16. Выключить измеритель температуры тумблером 22, выключить последовательно тумблеры 19, 20, 17, 18 и выключить стенд тумблером 16.

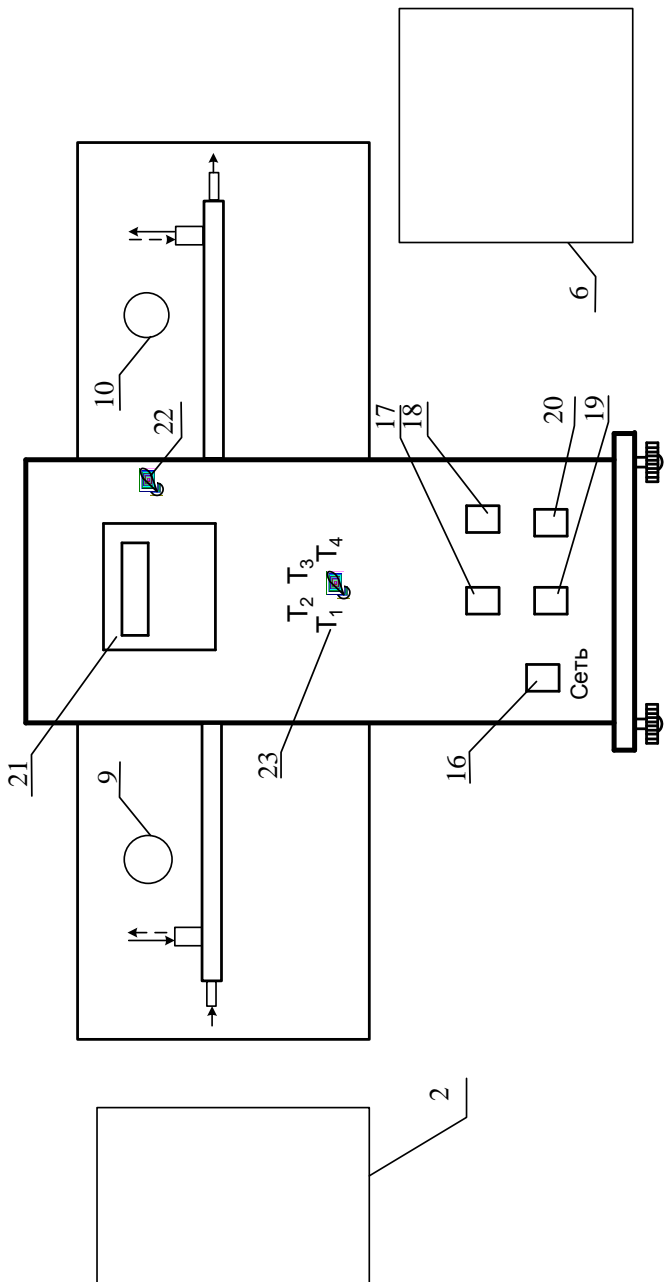


Рис. 3. Внешний вид экспериментальной установки



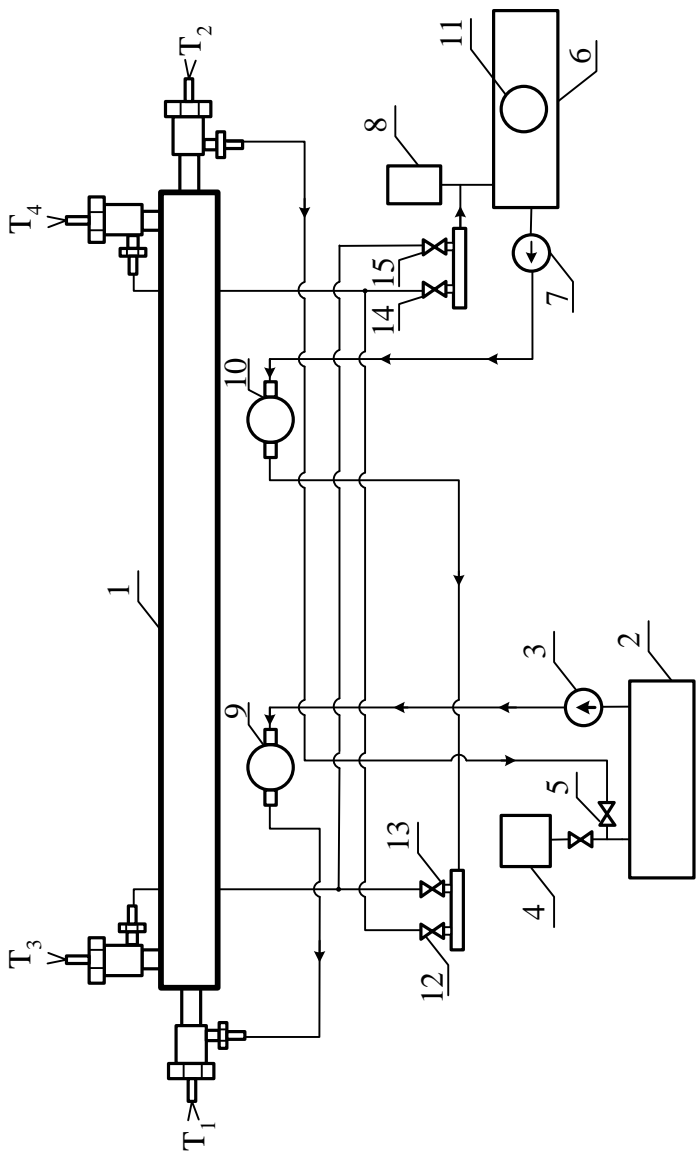


Рис.4. Принципиальная схема рабочего участка

## Журнал наблюдений

Количество горячей воды  $V_1 = \underline{\hspace{2cm}}$  м<sup>3</sup> за время  $\tau_1 = \underline{\hspace{2cm}}$  с.

Количество холодной воды  $V_2 = \underline{\hspace{2cm}}$  м<sup>3</sup> за время  $\tau_2 = \underline{\hspace{2cm}}$  с.

№ опыта	Температура			
	T <sub>1</sub> , °C	T <sub>2</sub> , °C	T <sub>3</sub> , °C	T <sub>4</sub> , °C
1				
2				
⋮				
N				

### 5. Обработка результатов эксперимента

#### *Экспериментальное определение коэффициента теплопередачи*

1. Определить объемные расходы горячей и холодной воды, м<sup>3</sup>/с:

$$\dot{V}_1 = \frac{V_1}{\tau_1}; \quad (26)$$

$$\dot{V}_2 = \frac{V_2}{\tau_2}. \quad (27)$$

2. Найти массовые расходы горячей и холодной воды, кг/с:

$$G_1 = \rho_1 \cdot \dot{V}_1; \quad (28)$$

$$G_2 = \rho_2 \cdot \dot{V}_2, \quad (29)$$

где  $\rho_1$  – плотность горячей воды, определяемая по справочным таблицам [2] при средней температуре горячей воды,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\rho_2$  – плотность холодной воды, определяемая по [2] при средней температуре холодной воды,  $\text{кг/м}^3$ .

3. Рассчитать тепловой поток, отдаваемый горячим теплоносителем:

$$Q_1 = G_1 c_{p1} (T_1' - T_1''), \quad (30)$$

где  $c_{p1}$  – массовая изобарная теплоемкость горячей воды, определяемая по [2] при средней температуре горячей воды,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

4. Рассчитать тепловой поток, воспринимаемый холодным теплоносителем:

$$Q_2 = G_2 c_{p2} (T_2'' - T_2'), \quad (31)$$

где  $c_{p2}$  – массовая изобарная теплоемкость холодной воды, определяемая по [2] при средней температуре холодной воды,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

5. Найти тепловые потери в окружающую среду:

$$Q_{\text{пот}} = Q_1 - Q_2. \quad (32)$$

6. Построить график изменения температур вдоль поверхности теплообмена (см.рис.1 и рис.2).

7. Рассчитать среднюю разность температур по формулам (9) или (10).

8. Определить коэффициент теплопередачи из формулы (3), считая  $Q$  равным  $Q_2$ :

$$k = \frac{Q_2}{\Delta t \cdot F}, \quad (33)$$

где  $F = \pi \cdot d_{\text{ср}} \cdot \ell$ , а  $d_{\text{ср}} = 0,5(d_{\text{вн}} + d_{\text{нар}})$ .

*Теоретическое определение  
коэффициента теплопередачи*

1. Найти скорости движения теплоносителей:  
— горячей воды

$$w_1 = \frac{G_1}{\rho_1 \cdot f_1}, \quad (34)$$

где  $f_1$  – площадь поперечного сечения внутренней трубки находят по формуле (5);

— холодной воды

$$w_2 = \frac{G_2}{\rho_2 \cdot f_2}, \quad (35)$$

где  $f_2$  – площадь поперечного сечения кольцевого канала находят по формуле (6).

2. Рассчитать критерии Рейнольдса:

— для горячей воды

$$Re_1 = \frac{w_1 R_{01}}{\nu_1}, \quad (36)$$

где  $R_{01}$  – определяющий размер для расчета режима движения горячей воды находят по формуле (23);  $\nu_1$  – кинематический коэффициент вязкости горячей воды, определяемый по [2] при средней температуре горячей воды,  $m^2/c$ ;

— для холодной воды

$$Re_2 = \frac{w_2 R_{02}}{\nu_2}, \quad (37)$$

где  $R_{02}$  – определяющий размер для расчета режима движения холодной воды находят по формуле (24);  $\nu_2$  – кинематический коэффициент вязкости холодной воды, определяемый по [2] при средней температуре холодной воды,  $m^2/c$ .

3. По значениям критериев Рейнольдса определить режимы течения каждого из теплоносителей.

Рассчитать безразмерные коэффициенты теплоотдачи – критерии Нуссельта для горячего и холодного теплоносителей по формулам (18), (19) или (20) в зависимости от режима течения теплоносителей.

**Замечание.** Для расчета поправочного коэффициента  $\varepsilon_t$ , входящего в формулы (18), (19) и (20) необходимо знать температуры внутренней и наружной поверхности центральной трубы, которые находят методом итераций. В первом приближении температуру стенок  $T_{w1}$  и  $T_{w2}$  можно рассчитать по приближенным формулам:

$$T_{w1} = T_1 - \frac{\overline{\Delta T}}{2}; \quad T_{w2} = T_{w1} - 1, \quad (38)$$

где  $\overline{\Delta T}$  – средняя разность температур теплоносителей, °С.

4. Рассчитать коэффициенты теплоотдачи:

— от горячей воды к стенке

$$\alpha_1 = Nu_1 \frac{\lambda_1}{R_{01}}, \quad (39)$$

где  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности горячей воды, определяемый по [2] при средней температуре горячей воды, Вт/(м·К);

— от стенки к холодной воде

$$\alpha_2 = Nu_2 \frac{\lambda_2}{R_{02}}, \quad (40)$$

где  $\lambda_2$  – коэффициент теплопроводности холодной воды, определяемый по [2] при средней температуре холодной воды, Вт/(м·К).

5. Определить коэффициент теплопередачи по формуле (11), принимая коэффициент теплопроводности материала стенки внутренней трубы  $\lambda = 15 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ .

6. Сравнить экспериментальное и расчетное значения коэффициента теплопередачи.

### **Отчет о выполнении лабораторной работы**

#### **должен содержать:**

- задание на выполнение лабораторной работы;
- принципиальную схему экспериментального стенда;
- журнал наблюдений;
- результаты обработки эксперимента;
- выводы по работе.

## 6. Контрольные вопросы

1. *Какие устройства называют теплообменными аппаратами?*
2. *Дайте классификацию теплообменных аппаратов по принципу их действия.*
3. *Дайте определение понятий «теплопередача» и «теплоотдача».*
4. *Дайте определение коэффициента теплоотдачи и коэффициента теплопередачи. Укажите их размерности.*
5. *Напишите уравнение теплового баланса рекуператора.*
6. *Дайте определение понятия «водяной эквивалент»?*
7. *Напишите уравнение теплопередачи в рекуператоре. Напишите формулу для расчета коэффициента теплопередачи.*
8. *Изобразите схематично графики изменения температур теплоносителей вдоль поверхности теплообмена.*
9. *Опишите методику расчета средней разности температур в рекуператоре?*
10. *Поясните принцип работы и назначение элементов экспериментальной установки.*
11. *Перечислите измерительные приборы и дайте характеристику измеряемых величин, указав единицы их измерения.*
12. *Поясните методику экспериментального определения коэффициента теплопередачи.*
13. *Поясните методику расчета коэффициента теплопередачи по критериальным формулам.*
14. *Опишите режимы течения горячего и холодного теплоносителей в Вашем эксперименте.*
15. *Опишите алгоритм расчета коэффициентов теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке и от стенки к холодному теплоносителю.*

16. Дайте характеристику понятий «определяющий размер», «определяющая температура», «определяющая скорость».
17. Опишите метод расчета расходов теплоносителей в теплообменном аппарате.
18. Опишите метод расчета скорости движения теплоносителей в теплообменном аппарате.

## 7. Список рекомендуемой литературы

**1. Исаченко, В.П.** Теплопередача: учеб. для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

**2. Краснощеков, Е.А.** Задачник по теплопередаче: учеб. пособие для вузов / Е.А. Краснощеков, А.С. Сукомел– М.: Энергия, 1980. – 288 с.

## Содержание

1. Задание	3
2. Основы теории	3
3. Экспериментальная установка	12
4. Порядок проведения эксперимента	14
5. Обработка результатов эксперимента	18
6. Контрольные вопросы	23
7. Список рекомендуемой литературы	23