

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина»

Кафедра теоретических основ теплотехники

2393

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ
В РЕКУПЕРАТИВНОМ ТЕПЛООБМЕННОМ
АППАРАТЕ ТИПА «ТРУБА В ТРУБЕ»**

Методические указания к выполнению лабораторной работы

Издание переработанное и дополненное

Иваново 2016

Составители: В.В. БУХМИРОВ
Т.Е. СОЗИНОВА
Г.А. РОДИОНОВ
Редактор И.М. ЧУХИН

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 13.03.01 «Теплотехника и теплоэнергетика», 13.03.03 «Энергетическое машиностроение», «Ядерная энергетика и теплофизика» и изучающих курс «Тепломассообмен».

Методические указания утверждены цикловой методической комиссией ТЭФ

Рецензент

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

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/(м²·К); $\overline{\Delta T}$ – средняя разность температур между горячим и холодным теплоносителями (средний температурный напор), °С; F – площадь поверхности теплообмена, м².

Расходы теплоносителей рассчитывают по уравнению неразрывности:

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

где ρ – плотность теплоносителя, кг/м³; \overline{w} – средняя скорость теплоносителя, м/с; f – площадь поперечного сечения канала для прохода теплоносителя, м².

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 проточной 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 ΔT_{\max} и ΔT_{\min} – максимальная и минимальная разности температур теплоносителей (см. рис.1 и рис.2), °С; ΔT_a – среднеарифметическая разность температур, °С; ΔT_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:

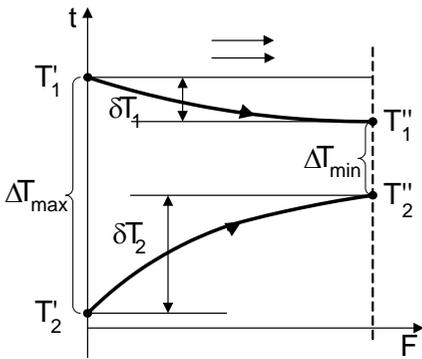
$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (11)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке, Вт/(м²·К); δ – толщина стенки, м; λ – коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/(м·К); α_2 – коэффициент теплоотдачи от стенки к холодному теплоносителю, Вт/(м²·К).

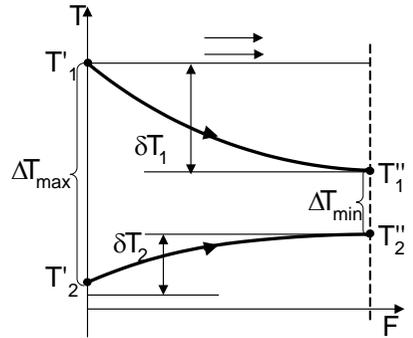
Коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 рассчитывают по критериальным формулам для вынужденного движения флюида в трубах и каналах [1]. При движении жидкостей и газов в трубах и каналах форма критериального уравнения зависит от режима движения жидкости. В общем случае критериальное уравнение имеет вид

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

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

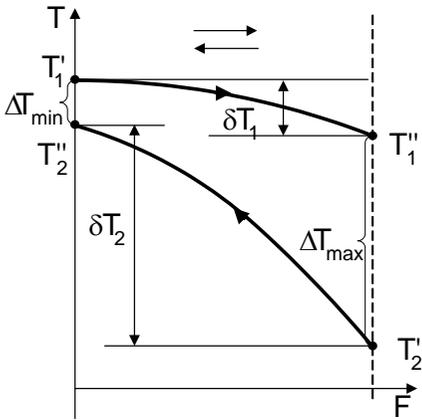


a) $W_1 > W_2$

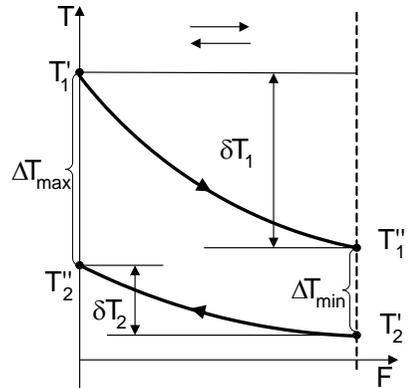


б) $W_1 < W_2$

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



a) $W_1 > W_2$



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 α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); R_0 – определяющий (характерный) размер, м; λ – 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; ν – кинематический коэффициент вязкости текучей среды, м²/с; β – коэффициент объемного расширения флюида, 1/К; ΔT – 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 ν – 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

ℓ/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 ε_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 № 1

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 – K1;
- 13 – вентиль, регулирующий направление движения холодной воды – K2;
- 14 – вентиль, регулирующий направление движения и расход холодной воды при прямотоке – K3;
- 15 – вентиль, регулирующий направление движения и расход холодной воды при противотоке – K4;
- 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.

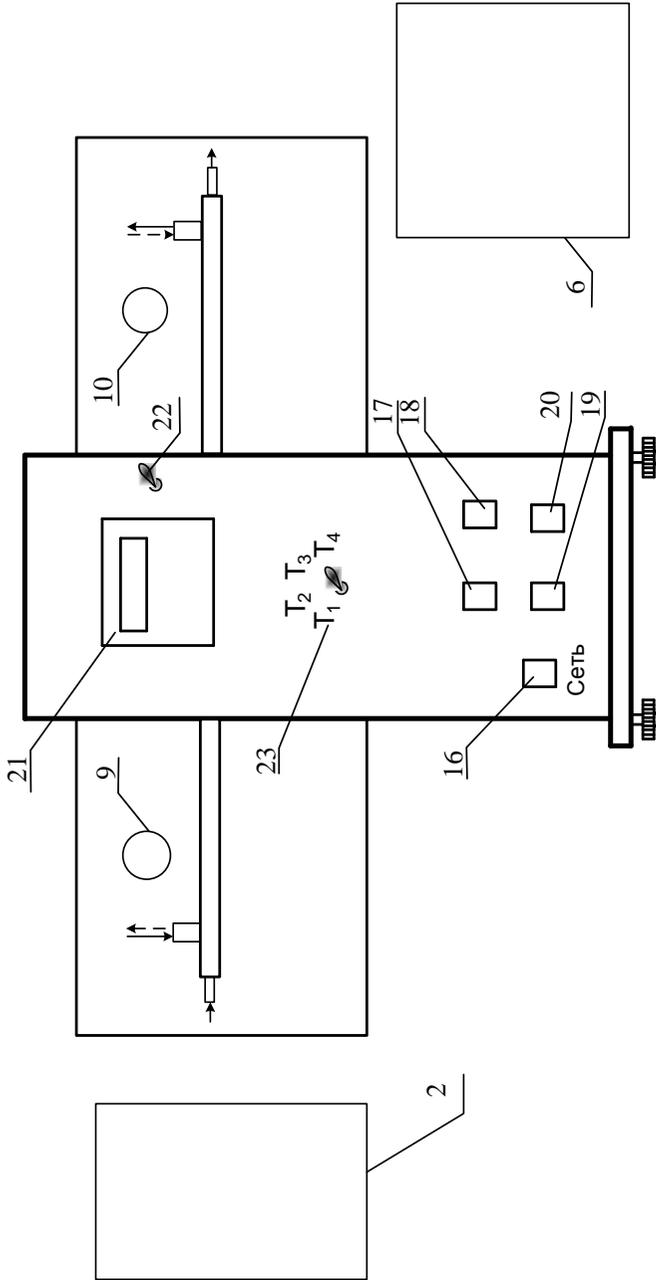


Рис. 3. Внешний вид экспериментальной установки № 1

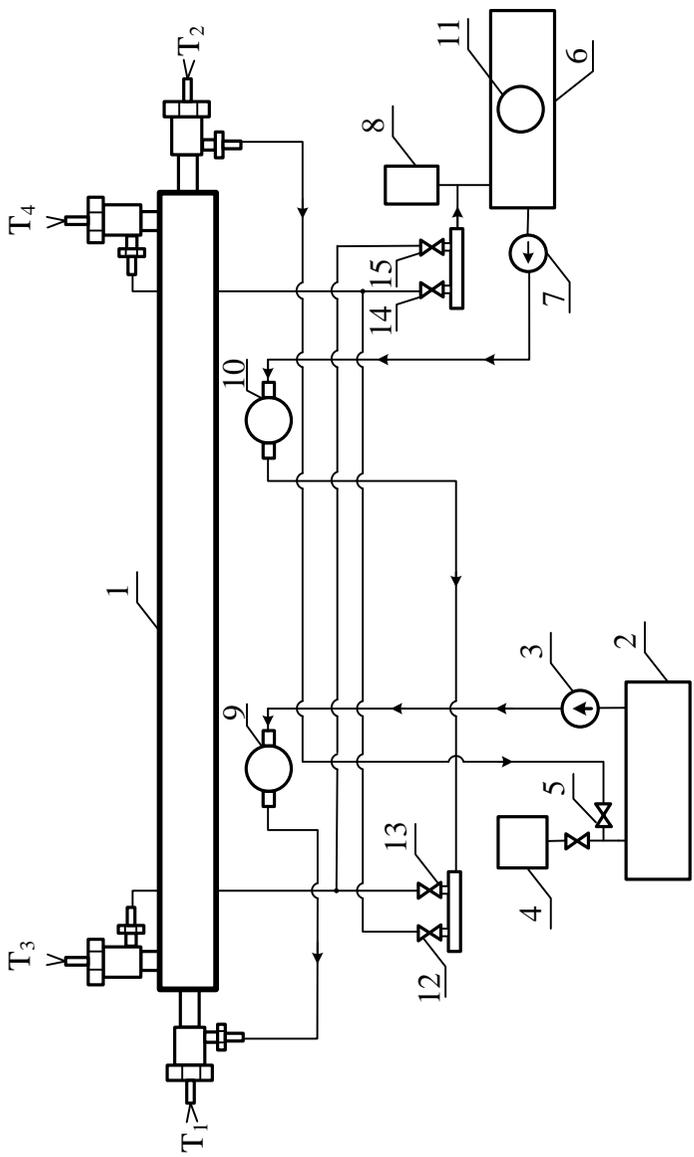


Рис.4. Принципиальная схема рабочего участка экспериментальной установки № 1

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').

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 (положение вентилей – горизонтальное), а вентили 12 (К1) и 15 (К4) – открыть (положение вентилей – вертикальное).

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

7. Произвести отсчет с помощью секундомера промежутка времени τ_1 , за который прошел соответствующий объем горячей воды, определяемый по счетчику 9.

Показания счетчика 9 внести в журнал наблюдений.

8. Произвести отсчет с помощью секундомера промежутка времени τ_2 , за который прошел соответствующий объем холодной воды, определяемый по счетчику 10.

Показания счетчика 10 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 T_1, T_2, T_3, T_4 по измерителю температур 21, переключая терморпары с помощью тумблера 23.

Показания температур внести в журнал наблюдений.

13. Фиксировать значения температур T_1, T_2, T_3, T_4 и времени τ_1 и τ_2 каждые 5 минут.

14. При достижении температуры горячей воды на входе в теплообменный аппарат $45 \div 50$ °С завершить эксперимент.

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.

- 10 – счетчик холодной воды;
- 11 – вентилятор холодильника;
- 12 – вентиль, регулирующий направление движения холодной воды – K1;
- 13 – вентиль, регулирующий направление движения холодной воды – K2;
- 14 – вентиль, регулирующий направление движения и расход холодной воды при прямотоке – K3;
- 15 – вентиль, регулирующий направление движения и расход холодной воды при противотоке – K4;
- 16 – тумблер «Сеть»;
- 17 – тумблер «Насос радиатора»;
- 18 – тумблер «Вентилятор радиатора»;
- 19 – тумблер «Насос термостата»;
- 20 – тумблер «Нагреватель термостата»;
- 21 – измерители температур ТРМ 200;
- 22 – тумблер включения измерителя температур;
- 23 – импульсный счетчик.

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 импульсному счетчику 23, сигнал на который приходит со счетчика 9, установленного 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 алюминиевый радиатор. Радиатор постоянно обдувается блоком вентиляторов 11.

Расход холодной воды определяют по импульсному счетчику 23, сигнал на который приходит со счетчика 10, установленного 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 термомпары. Все термомпары подключены к измерителям 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'');

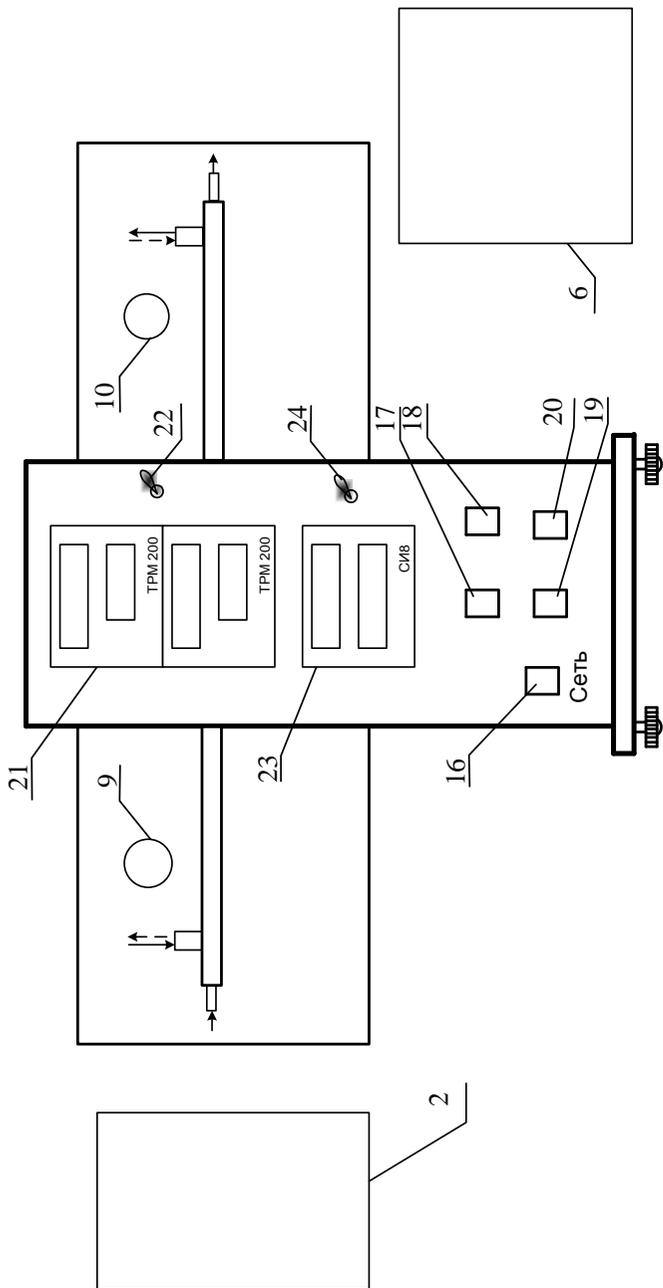


Рис. 5. Внешний вид экспериментальной установки № 2

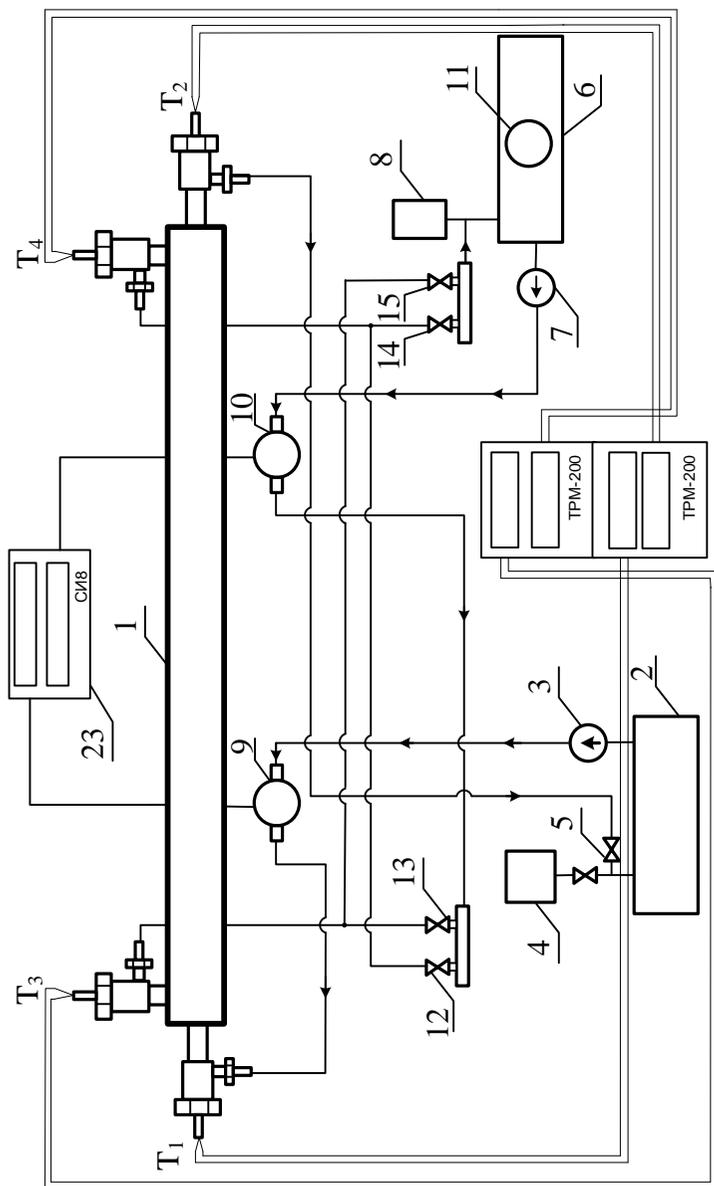


Рис.6. Принципиальная схема рабочего участка экспериментальной установки № 2

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').

Экспериментальная установка № 2 подключена к ноутбуку. На ноутбуке установлена программа для обработки экспериментальных данных (рис. 7). Алгоритм работы с программой следующий.

1. Запускаем файл «ГВТ.xls».

2. Внизу рабочего окна выбираем вкладку «Эксперимент».

3 По нажатию кнопки «Записать результат измерения» в таблицу «Текущие значения параметров» записываются значения температур и расходов теплоносителей.

4. Все значения из таблицы «Текущие значения параметров» необходимо переписать в журнал наблюдений.

Отключить приборы				Записать результат измерения		
Текущие значения параметров						
Температура				Внешняя труба	Внутренняя труба	
T_1	T_2	T_3	T_4	τ_1 , с/л	τ_2 , с/л	
70,309	67,65	50,74	54,18	6,91	29,12	
Результаты измерений						
№ оп	T_1	T_2	T_3	T_4	G_1	G_2
11:43:59	35,7246094	34,98339844	27,46533	28,716309	6,549E-05	3,4E-05
11:56:12	44,3740234	43,46582031	34,36719	36,063477	6,583E-05	3,43E-05
12:01:18	47,6318359	46,58984375	36,19434	38,097656	6,596E-05	3,45E-05

Рис. 7. Результаты обработки экспериментальных данных по компьютерной программе

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 термостата».

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.

Открытие вентиля осуществляется против часовой стрелки, закрытие – по часовой стрелке.

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

7. Вентилем К₃ отрегулировать необходимый расход воды во внешней трубе рабочего участка в режиме «прямоток», вентилем К₂ – в режиме «противоток».

8. Включить водоподогреватель 2 тумблером 20 «Нагреватель термостата»

9. Включить измерители температуры 21 тумблером 22.

10. Включить импульсные счетчики расхода горячей и холодной воды 23 тумблером 24. Счетчики осуществляют фиксацию времени, за которое через рабочий участок установки протекает один литр горячего и холодного теплоносителя.

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

5. Обработка результатов эксперимента

Экспериментальное определение коэффициента теплопередачи

1. Определить объемные расходы горячей и холодной воды, м³/с:

– для экспериментальной установки № 1:

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

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

воды, м³/с:

– для экспериментальной установки № 2:

$$\dot{V}_1 = \frac{10^{-3}}{\tau_1}; \quad (27)$$

$$\dot{V}_2 = \frac{10^{-3}}{\tau_2}. \quad (28)$$

где τ_1 , τ_2 – время, за которое по рабочему участку лабораторной установки протекает соответственно 1 л горячей или холодного теплоносителя, с. Определяется по показаниям импульсного счетчика расхода воды 23.

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

$$G_1 = \rho_1 \cdot \dot{V}_1; \quad (29)$$

$$G_2 = \rho_2 \cdot \dot{V}_2, \quad (30)$$

где ρ_1 – плотность горячей воды, определяемая по справочным таблицам [2] при средней температуре горячей воды, кг/м^3 ; ρ_2 – плотность холодной воды, определяемая по [2] при средней температуре холодной воды, кг/м^3 .

3. Рассчитать тепловой поток, отдаваемый горячим теплоносителем:

$$Q_1 = G_1 c_{p1} (T_1' - T_1''), \quad (31)$$

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:

$$Q_2 = G_2 c_{p2} (T_2'' - T_2'), \quad (32)$$

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:

$$Q_{\text{пот}} = Q_1 - Q_2. \quad (33)$$

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

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

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

$$k = \frac{Q_2}{\Delta t \cdot F}, \quad (34)$$

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

*Определение коэффициента теплопередачи
с использованием известных критериальных уравнений*

1. Найти скорости движения теплоносителей:
— горячей воды

$$w_1 = \frac{G_1}{\rho_1 \cdot f_1}, \quad (35)$$

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

— холодной воды

$$w_2 = \frac{G_2}{\rho_2 \cdot f_2}, \quad (36)$$

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

2. Рассчитать критерии Рейнольдса:

— для горячей воды

$$Re_1 = \frac{w_1 R_{01}}{\nu_1}, \quad (37)$$

где R_{01} – определяющий размер для расчета режима движения горячей воды находят по формуле (23); ν_1 – кинематический коэффициент вязкости горячей воды, определяемый по [2] при средней температуре горячей воды, m^2/c ;

— для холодной воды

$$Re_2 = \frac{w_2 R_{02}}{\nu_2}, \quad (38)$$

где R_{02} – определяющий размер для расчета режима движения холодной воды находят по формуле (24); ν_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 ε_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:

$$T_{w1} = T_1 - \frac{\overline{\Delta T}}{2}; \quad T_{w2} = T_{w1} - 1, \quad (39)$$

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

4. Рассчитать коэффициенты теплоотдачи:

— от горячей воды к стенке

$$\alpha_1 = Nu_1 \frac{\lambda_1}{R_{01}}, \quad (40)$$

где λ_1 – коэффициент теплопроводности горячей воды, определяемый по [2] при средней температуре горячей воды, Вт/(м·К);

— от стенки к холодной воде

$$\alpha_2 = Nu_2 \frac{\lambda_2}{R_{02}}, \quad (41)$$

где λ_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 $\lambda = 15$ Вт/(м·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. **Бухмиров, В.В.** Теплообмен: учеб. пособие. – ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2014. – 360 с.

2. **Бухмиров, В.В.** Справочные материалы для решения задач по курсу «Теплообмен»: учеб. пособие / В.В. Бухмиров, Д.В. Ракутина, Ю.С. Солнышкова / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2009. – 104 с.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ
В РЕКУПЕРАТИВНОМ ТЕПЛООБМЕННОМ
АППАРАТЕ**

Методические указания к выполнению лабораторной работы

Составители: БУХМИРОВ Вячеслав Викторович

СОЗИНОВА Татьяна Евгеньевна

РОДИОНОВ Геннадий Александрович

Редактор Т.В. Соловьева

Лицензия ИД № 05285 от 4 июля 2001 г.

Подписано в печать Формат 60×84¹/₁₆.

Печать плоская. Усл.печ.л.1,86. Тираж 50 экз. Заказ № .

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

Отпечатано в РИО ИГЭУ

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