

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Набережночелнинский институт (филиал)
ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

**Исследование работы рекуперативного
теплообменного аппарата типа «труба в трубе»**

учебно-методическое пособие

для бакалавров
по дисциплинам
основных профессиональных образовательных программ
по направлениям и профилям подготовки:

13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника (профиль
«Промышленная теплоэнергетика»),

16.03.03 Холодильная, криогенная техника и системы
жизнеобеспечения (профиль «Холодильная техника и
системы жизнеобеспечения»),

15.03.02 Технологические машины и оборудование (профиль
«Машины и аппараты пищевых производств»)

Набережные Челны
2019

УДК 621.184(076.5)

ББК 31.368я73-5

И88

Исследование работы рекуперативного теплообменного аппарата типа «труба в трубе»: Методические указания к лабораторной работе. Для бакалавров. /Составители: И.Х. Ибрафиров, И.А. Гайсин, И.М. Арсланов, А.Д.Самигуллин. – Набережные Челны

Указания содержат сведения о принципе действия, классификации и методике расчета теплообменных аппаратов. В указаниях представлены методики испытаний теплообменного аппарата типа «труба в трубе» и оценки эффективности теплообменников.

Исследование работы рекуперативного теплообменного аппарата типа «труба в трубе».

Цель работы: Испытание теплообменного аппарата на различных режимах работы с целью определения его тепловой мощности, коэффициентов теплопередачи, тепловой эффективности и числа переноса единиц теплоты на каждом из режимов.

Теоретические основы.

Теплообменным аппаратом называется техническое устройство, в котором горячий теплоноситель отдает теплоту холодному теплоносителю.

В качестве теплоносителя в тепловых аппаратах используется разнообразны капельные и газообразные жидкости в самом широком диапазоне давлений и температур.

По принципу действия тепловые аппараты делятся на рекуперативные, регенеративные и смесительные.

В рекуперативных теплообменных аппаратах передача теплоты от нагревающей жидкости к нагреваемой происходит через твердую разделительную стенку. К таким теплообменным аппаратам относятся паровые котлы, радиаторы, пароперегреватели, поверхностные конденсаторы.

В регенеративных аппаратах горячий теплоноситель отдает свою теплоту аккумулирующему устройству, которое в свою очередь отдает теплоту второй жидкости – холодному теплоносителю, т.е. одна и та же поверхность нагрева омывается то холодной, то горячей жидкостью.

В смесительных аппаратах передача теплоты: от горячего к холодному происходит при непосредственном смешивании обоих теплоносителей.

В теплообменных аппаратах движение жидкости осуществляется по трем основным принципам.

Прямоток – направлении жидкости горячего и холодного теплоносителя совпадают (Рис. 1а).

Противоток – направление движения горячего теплоносителя противоположно движению холодного теплоносителя (Рис. 1б)

Поперечный ток – горячий теплоноситель движется перпендикулярно движению холодного теплоносителя (Рис. 1в).

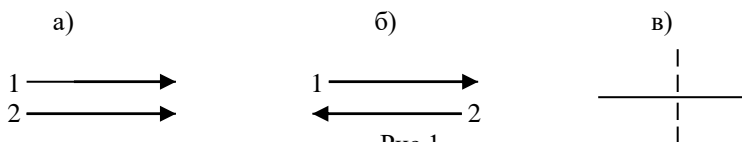


Рис.1.

Основными расчетными уравнениями теплообмена при стационарном режиме являются уравнение теплопередачи (1) и уравнение теплового баланса (2).

Уравнение теплопередачи

$$Q=K \cdot F \cdot (T_1-T_2) \tag{1}$$

где Q – тепловой поток, Вт;

K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К);

F – площадь поверхности теплообмена в аппарате, м²;

T_1 и T_2 – температуры горячего и холодного теплоносителей, К

Уравнение теплового баланса при условии отсутствия тепловых потерь и фазовых переходов

$$Q = m_1 \cdot \Delta i_1 = m_2 \cdot \Delta i_2 \tag{2}$$

или

$$Q = V_1 \cdot \rho_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_{1вх} - T_{1вых}) = V_2 \cdot \rho_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_{2вых} - T_{2вх}) \tag{3}$$

где:

1 – индекс параметра горячего теплоносителя;

2 – индекс параметра холодного теплоносителя;

Δi_1 – разность теплоемкостей горячего теплоносителя между входным и выходным сечениями аппарата;

Δi_2 – разность теплоемкостей холодного теплоносителя между входным и выходным сечениями аппарата;

$V_1 \cdot \rho_1$ и $V_2 \cdot \rho_2$ – массовые расходы теплоносителей, кг/с;

c_{p1} и c_{p2} – удельные теплоемкости жидкостей в интервале температур от $T_{вх}$ до $T_{вых}$;

$T_{1вх}$ и $T_{2вх}$ – температуры жидкостей при входе в аппарат, К;

$T_{1вых}$ и $T_{2вых}$ – температуры жидкостей при выходе из аппарата, К.

Произведение $V \cdot \rho \cdot c_p = W$ называется водяным (условным) эквивалентом.

Уравнение теплового баланса может быть представлено и в следующем виде:

$$(T_1 - T_1)/(T_2 - T_2) = W_2/W_1 \quad (4)$$

При проектировании новых теплообменных аппаратов целью теплового расчета является определение площади поверхности теплообмена, а если последняя известна, то целью расчета является определение конечных температур рабочих жидкостей.

Тепловой поток, переданный через всю площадь поверхности F , при постоянном среднем коэффициенте теплопередачи K определяется уравнением:

$$Q = \int K \cdot dF \cdot \Delta T = K \cdot dF \cdot \Delta T_{cp} \quad (5)$$

где ΔT_{cp} – средний температурный напор по всей площади поверхности нагрева (средняя разность температур между холодным и горячим теплоносителем), K .

Средний температурный напор ΔT_{cp} является движущей силой процесса теплопередачи. Независимо от взаимного направления движения теплоносителей (рис. 2) ΔT_{cp} определяется по уравнению:

$$\Delta T_{cp} = (\Delta T_{\text{больший}} - \Delta T_{\text{малый}}) / (2,3 \lg(\Delta T_{\text{больший}} / \Delta T_{\text{малый}})) \quad (6)$$

В этом случае величину ΔT_{cp} называют среднелогарифмическим температурным напором.

Для аппаратов с прямотоком

$$\Delta T_{cp} = \{(T_{1\text{вх}} - T_{2\text{вх}}) - (T_{1\text{вых}} - T_{2\text{вых}})\} / \{2,3 \cdot \lg[(T_{1\text{вх}} - T_{2\text{вх}}) / (T_{1\text{вых}} - T_{2\text{вых}})]\} \quad (7)$$

Для аппаратов с противотоком

$$\Delta T_{cp} = \{(T_{1\text{вых}} - T_{2\text{вх}}) - (T_{1\text{вх}} - T_{2\text{вых}})\} / \{2,3 \cdot \lg[(T_{1\text{вых}} - T_{2\text{вх}}) / (T_{1\text{вх}} - T_{2\text{вых}})]\} \quad (8)$$

Численное значение ΔT_{cp} для аппаратов с противотоком при одинаковых условиях всегда больше ΔT_{cp} для аппаратов с прямотоком имеют меньшие размеры.

При $(\Delta T_{\text{больший}} / \Delta T_{\text{малый}}) < 1,4$ средний температурный напор ΔT_{cp} можно рассчитать как среднеарифметическую разность температур:

$$\Delta T_{cp} = (\Delta T_{\text{больший}} + \Delta T_{\text{малый}}) / 2 \quad (9)$$

Коэффициент теплопередачи K по физическому смыслу является термической проводимостью того пути, по которому тепло передается от горячего теплоносителя к холодному.

Вдоль этого пути имеются следующие термические сопротивления:

1. сопротивление при переходе тепла от основной массы (потока) первого теплоносителя к поверхности трубы ($1/\alpha_1$, где α_1 - коэффициент теплоотдачи или термическая проводимость ламинарного пристенного слоя),

2. термическое сопротивление слоя загрязнений на стенке трубы (накипь, ржавчина) со стороны первого теплоносителя,

3. термическое сопротивление стенки трубы ($\delta_{ст}/\lambda_{ст}$, $\delta_{ст}$ - толщина стенки, $\lambda_{ст}$ - коэффициент теплопроводности материала трубы),

4. термическое сопротивление загрязнений на стенке со стороны второго теплоносителя,

5. термическое сопротивление ламинарного слоя при переходе тепла от наружной стенки трубы к основной массе второго теплоносителя ($1/\alpha_2$).

Общее сопротивление системы равно сумме отдельных сопротивлений, так как тепловой поток проходит все сопротивления последовательно.

Коэффициент теплопередачи (K) является величиной, обратной термическому сопротивлению:

$$K = \frac{1}{R_{общ}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \sum r_{загр} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (10)$$

$$\sum r_{загр} = \delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 \quad (11)$$

где: δ_i - толщина загрязнений;
 λ_i , - коэффициент теплопроводности загрязнений (по обе стороны стенки).

Описание экспериментальной установки

Рабочий элемент установки (Рис. 2) – теплообменный аппарат (Та) типа “труба в трубе”. Теплообменный аппарат состоит из двух коаксиальных цилиндров (труб). По внутреннему цилиндру 9 движется греющий теплоноситель (вода), по наружному 10 движется обогреваемый теплоноситель (воздух). Внутренний цилиндр имеет внутренний диаметр (14+0,1) мм и толщину стенки (1+0,1) мм, внутренний диаметр наружной трубы (34+0,1) мм. Длина внутреннего цилиндра, по которому подсчитывается поверхность теплообмена, равна (990+1) мм.

Горячая вода, подаваемая насосом термостата 8, проходит вентиль 7, служащий для регулирования расхода, и диафрагму 1а, предназначенную для измерения расхода воды, поступает к четырехходовому крану

Схема изменений представлена на рис.2, а общий вид установки на рис. 3.

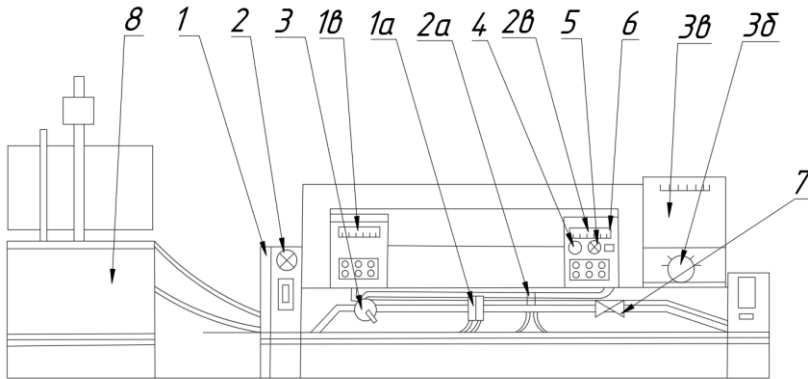


Рис. 3. Общий вид установки ТП-5

Для измерения расходов воды и воздуха установлены диафрагмы (1а) и (2а), перепад давлений в которых регистрируется с помощью мембранных дифференциальных манометров ДМ-ЭР2 (1б и 2б), снабжённых преобразователями, а сигналы постоянного тока регистрируются миллиамперметрами М1730А (1в и 2в).

Температура воздуха и воды на входе в ТА и на выходе из него измеряется термодарами (1-2а), (2-3а), (3-3а) и (4-3а), которые установлены в гильзах, расположенных в подводящих и отводящих патрубках (рис. 2). Термодары через переключатель (3б) поочередно подключаются к потенциометру КСП2-005 (3в), шкала которого градуирована в кельвинах.

Порядок проведения опыта

Тумблером 1, расположенным на левой стойке (рис. 3), включить установку в сеть (загорается контрольная лампочка 2). С помощью крана 3 включить ТА по прямой схеме.

Открыть вентиль 7 и установить по показаниям миллиамперметра (1в), используя тарировочную кривую диафрагмы (2а), расход воды:

$$G_1 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$$

Кнопкой 6 включить двигатель вентилятора (загорается контрольная лампочка 5) и ручкой регулятора 4 установить по показанию миллиамперметра (2а), расход воздуха $G_2 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$ (режим №1).

Поддерживая постоянными расходы воздуха и воды, следить за изменением температуры теплоносителей по показаниям потенциометра.

Можно считать, что установка вышла на стационарный тепловой режим, если изменение температур в любой из измеряемых точек не превышает +1К за две минуты. После выхода установки на стационарный режим показания температур теплоносителей (термопары 1-3а, 2-3а, 3-3а, 4-4а) и показания милливольтметров 1в и 2в записать не менее трех раз с интервалом в две минуты в журнал наблюдений, составленный по форме:

№	Схема включения	Номер отсчета	Время от начала режима, мин.	Температура, С				Расход, дел	
				воды		воздуха		Воды, G ₁	Воздуха, G ₂
				ВХОД, t ₁	ВЫХОД, t ₁	ВХОД, t ₂	ВЫХОД, t ₂		

Записать температуру воздуха в помещении и барометрическое давление:

Барометрическое давление $B = \dots$ мм.рт.ст.

Температура окружающей среды $t_{o.c.} = \dots$ С.

Установить расход воды и воздуха, соответствующие режиму N2 ($G_1 = 6 \cdot 10^{-3}$ кг/с; $G_2 = 10 \cdot 10^{-3}$ кг/с), а затем режиму N3 ($G_1 = 6 \cdot 10^{-3}$ кг/с; $G_2 = 10 \cdot 10^{-3}$ кг/с) и повторить все измерения.

Изменить краном 3 направление движения воды, включив ТА по противоточной схеме, установить расходы воды и воздуха такие же как в режиме N3, и провести испытания в режиме N4 (противоток) аналогичным способом.

Открыть питание нагревателей термостата, вывести рукоятку 4 регулятора стрелки против часовой стрелки до упора, выключить водяной

насос и вентилятор, закрыть вентиль 7 и отключить питание установки тумблером 1.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ.

1. Построить графики изменения во времени температур греющего и нагреваемого теплоносителей на входе в ТА и на выходе из него.

Используя графики, определить измерения, соответствующие стационарным периодам работы на каждом из режимов.

2. Определить показания термомпар 1-3а, 2-3а, 3-3а, 4-3а не менее чем по трем измерениям в каждом из стационарных периодов и принять для расчетов средние значения температур $t_{1\text{вх}}$, $t_{1\text{вых}}$, $t_{2\text{вх}}$, $t_{2\text{вых}}$.

3. Построить графики измерения температур теплоносителей, по длине теплообменного аппарата, используя значение температур теплоносителей на входе в аппарат и на выходе из него и учитывая схему включения. Подсчитать для прямоточного или противоточного схем значения большего (Δt_{δ}) и меньшего ($\Delta t_{\text{м}}$) температурных напоров в начале и конце поверхности теплообмена.

4. Вычислить значение среднего температурного напора $\Delta t_{\text{ср}}$: при $\Delta t_{\delta}/\Delta t_{\text{м}} < 1.4$ – как среднее арифметическая величина:

$$\Delta t_{\text{ср}} = (\Delta t_{\delta} + \Delta t_{\text{м}}) / 2;$$

а при $(\Delta t_{\delta}/\Delta t_{\text{м}}) \geq 1.4$ – как среднелогарифмическая величина:

$$\Delta t_{\text{ср}} = (\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{м}}) / [2.3 \cdot \lg(\Delta t_{\delta}/\Delta t_{\text{м}})]$$

5. Осреднить по стационарным периодам показания приборов (1в) и (2в) и найти расчетные (средние) расходы воды G_2 (кг/С) в каждом из режимов. Значения расходов определяют по тарировочным графикам.

6. Вычислить количество теплоты Q_2 (кДж/с), полученной воздухом:

$$Q_2 = G_2 \cdot c_{p2} \cdot (t_{2\text{вых}} - t_{2\text{вх}}),$$

где $c_{p2} = 1,005$ кДж/(кг·К) – теплоемкость воздуха.

7. Вычислить значение коэффициента теплопередачи [кДж/($\text{м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{с}$)] для каждого из режимов:

$$K = Q_2 / (F \Delta t_{\text{ср}}).$$

где $F = 486 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ – расчетная поверхность теплообмена, определяемая по формуле

$$F = L\pi(d_{\text{вн}} + d_{\text{нар}}) / 2$$

8. Подсчитать значения водяных эквивалентов W_1 и W_2 [кДж/(с·К)]:

$$W_1 = G_1 \cdot c_{p1}$$

$$W_2 = G_2 \cdot c_{p2}$$

Здесь $c_{p1} = 4,186$ кДж/(кг·К) и $c_{p2} = 1,005$ кДж/(кг·К) – теплоемкости воды и воздуха соответственно.

9. Подсчитать коэффициент тепловой эффективности ТА в каждом из режимов как отношение действительно переданной теплоты к предельному (максимально возможному) количеству теплоты, которое может быть передано от горячего теплоносителя к холодному теплоносителю в данных условиях:

$$F = Q_2 / Q_{\text{пред}} = Q_2 / [W_{\min}(t_1 - t_2)],$$

где W_{\min} – наименьшее из значений W_1 и W_2 .

10. Подсчитать число единиц переноса теплоты (безразмерный коэффициент теплопередачи):

$$N = KF / W_{\min}$$

11. Для режимов 1, 2, 3 (прямоток) построить графики изменения величин K , F , N в зависимости от расхода воздуха G_2 . Нанести на графики точки, соответствующие режиму 4 (противоток).

12. Используя полученные графики и другие результаты обработки экспериментальных данных, определить:

а) влияние схемы включения теплообменного аппарата на величину среднего температурного напора;

б) влияние изменения расхода теплоносителя на значение коэффициента теплопередачи, температурного напора, тепловой мощности, тепловой эффективности.

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ.

Определить среднеквадратическую погрешность косвенного измерения коэффициента теплопередачи K на одном из режимов. Относительная среднеквадратическая погрешность определения коэффициента теплопередачи подсчитывается по формуле

$$\Delta K / K \cdot 100 = 100 [(\Delta G_2 / G_2)^2 + 2(\Delta t / t_2 - t_1)^2 + 2(\Delta d / d_H - d_B)^2 + (\Delta L / L)^2 + (\Delta t / \Delta t_{cp})^2]^{1/2}$$

где

$\Delta G_2 / G_2$ – относительная погрешность измерения расхода воздуха, определенная при градуировке диафрагмы 2а в комплексе с приборами 2б и 2в;

Δt – абсолютная погрешность изменений диаметра и длины внутреннего цилиндра рабочего участка, мм.

Список литературы.

1. Г. А. Мухачев, В. К. Шукин. Термодинамика и теплопередача. Москва. “Высшая школа”, 1991.
2. Лабораторный практикум по термодинамике и теплопередаче / Под ред. В. И. Кругова, В. В. Шишова. М., 1988.
3. Исаченко В. П. и др. Теплопередача. М., 1981.