

**Цель работы** – практическое ознакомление с методикой тепловых испытаний теплообменных аппаратов и получение навыков их проведения, экспериментальное определение значений коэффициента теплопередачи при различных условиях работы теплообменного аппарата, Экспериментальное изучение влияния режима работы и схемы включения теплообменного аппарата по направлению потоков теплоносителей на показатели его тепловой эффективности.

### Содержание работы

1. Ознакомление со схемой установки, ее конструкцией, методикой проведения работы.
2. Проведение испытаний теплообменного аппарата на различных режимах его работы и при разных схемах включения.
3. Обработка полученных данных, определение тепловой мощности аппарата, коэффициента теплопередачи и тепловой эффективности, числа единиц переноса теплоты в каждом из режимов.
4. Анализ влияния режима и схемы включения на показатели работы; оценка погрешности определения итоговых характеристик.

### Основы теории

Теплообменным аппаратом (ТА), или теплообменником, называют устройство, в котором теплота передается от одного теплоносителя (греющего, охлаждающего) к другому (обогреваемому, охлаждаемому). В зависимости от назначения, области применения, конструктивных особенностей ТА обычно имеют специальные названия: нагреватель, холодильник, воздухоподогреватель, регенератор, конденсатор и т. п.

По принципу действия различают рекуперативные, регенеративные и смешительные ТА.

*Рекуперативными* называются ТА, в которых теплота передается от горячего теплоносителя к холодному через разделяющую непроницаемую стенку.

*Регенеративными* называются ТА, в которых теплоаккумулирующая масса материала (насадка) попеременно омывается то горячим, то холодным теплоносителем.

*Смешительными* называются ТА, в которых горячий и холодный теплоносители вступают в непосредственный контакт между собой, образуя однородную смесь (если оба теплоносителя газообразные или жидкие вещества) или гетерогенную смесь (если теплоносители имеют разные агрегатные состояния и могут быть снова разделены после обмена теплотой).

В этой работе исследуется рекуперативный теплообменный аппарат типа «труба в трубе», поэтому дальнейшее изложение ведется в основном применительно к ТА такого типа.

Основными уравнениями при расчете ТА являются уравнения теплопередачи и теплового баланса.

Уравнение теплопередачи выражает количество переданной в ТА теплоты в единицу времени, т.е. тепловую мощность ТА в зависимости от разности температур теплоносителей, размеров поверхности теплообмена и коэффициента теплопередачи, характеризующего интенсивность процесса теплопередачи в данном ТА:

$$Q = \int_0^F k(T_1 - T_2)df, \quad (14.1)$$

где  $Q$  – поток теплоты, тепловая мощность, Вт;  $k$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>\*с);  $F$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;  $T_1, T_2$  – температуры греющего и обогреваемого теплоносителя соответственно, К.

Как коэффициент теплопередачи, так и разность температур изменяется вдоль поверхности нагрева, разделяющей теплоносители. Обычно в расчет вводят усредненное (или постоянное) значение  $k_{cp}$  и усредненную разность температур теплоносителей — средний температурный напор  $\Delta T_{cp}$ , записывая уравнение теплопередачи в виде

$$Q = k_{cp} \Delta T_{cp} F, \quad (14.2)$$

где средний температурный напор

$$\Delta T_{cp} = \frac{\int_0^F (T_1 - T_2) df}{F}, \quad (14.3)$$

Уравнение теплового баланса выражает количество переданной теплоты через изменение энтальпии или температуры теплоносителей:

$$Q = G_1 c_{p1} (T_1' - T_1'') = G_2 c_{p2} (T_2' - T_2'') \pm \Delta Q, \quad (14.4)$$

где  $G$  – расход, кг/с;  $c_p$  – изобарная удельная теплоемкость, Дж/(кг\*К); верхние индексы означают вход (') теплоносителя в ТА и его выход (') из ТА.

Значения  $\Delta Q$  характеризует потери теплоты в результате теплообмена с окружающей средой или паразитные теплопритоки, которые при хорошей теплоизоляции невелики, поэтому в упрощенных расчетах полагают  $\Delta Q = 0$ .

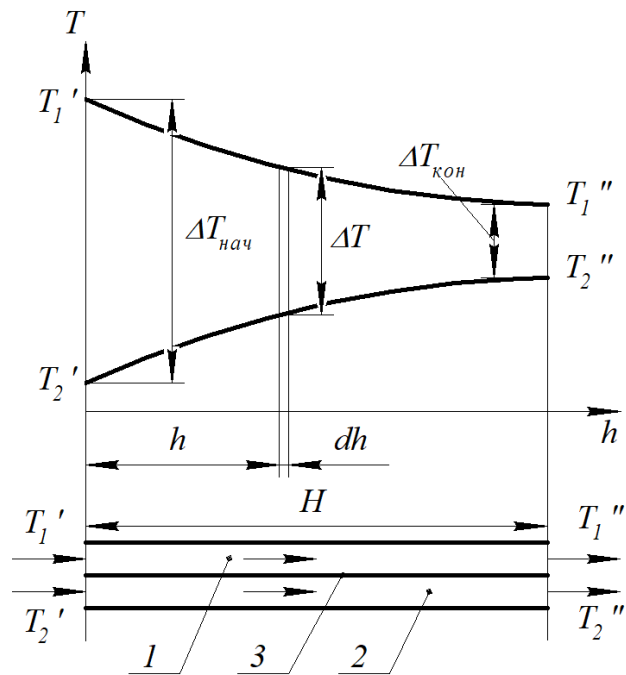
Произведение секундного расхода теплоносителя и его удельной теплоемкости называют *расходной (секундной) теплоемкостью*  $W$ . Так,  $W_1 = G_1 c_{p1}$ ;  $W_2 = G_2 c_{p2}$ . Изменения температур теплоносителей при прохождении через ТА обратно пропорциональны их расходным теплоемкостям

$$\frac{\delta T_1}{\delta T_2} = \frac{(T_1' - T_1'')}{(T_2' - T_2'')} = \frac{W_2}{W_1} = \frac{G_2 c_{p2}}{G_1 c_{p1}}, \quad (14.5)$$

В зависимости от вида расчета (проверочный, конструкторский и т. п.) целью определения может стать любая из величин, входящих в расчетные уравнения. В этой работе уравнение (14.4) используется для расчета тепловой мощности ТА, а уравнение (14.2) – для определения коэффициента теплопередачи  $k_{cp}$ .

Существует три основные схемы включения: *прямоточная, противоточная, перекрестная*, а также множество смешанных схем, полученных в результате различных комбинаций основных.

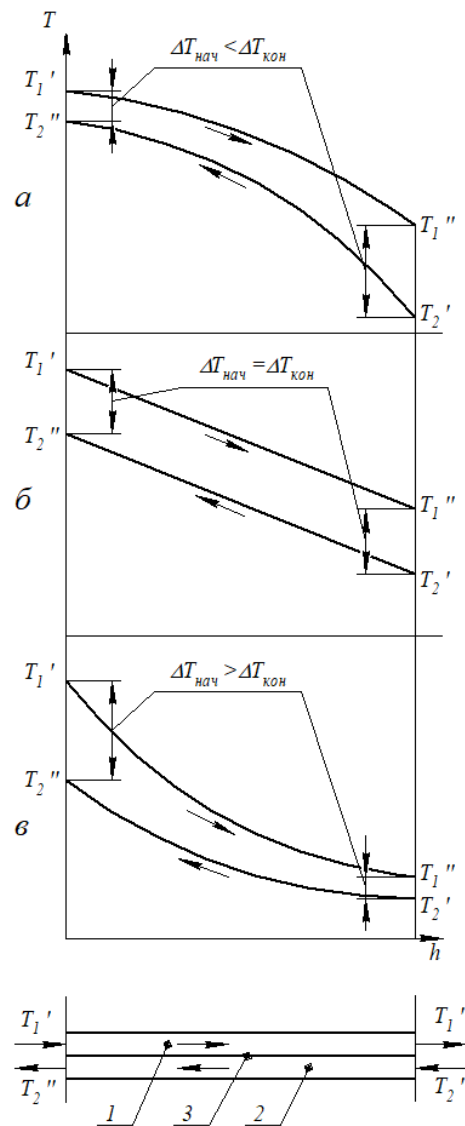
При прямоточной схеме включения (прямоток) (рис. 14.1) греющая и обогреваемая 2 среды движутся вдоль поверхности нагрева 3 в одном направлении так, что на входе в аппарат теплота передается от греющей среды к обогреваемой среде при относительно большой начальной разности температур  $\Delta T_{нач} = T_1' - T_2'$ . На выходе из аппарата теплота передается от остывшей греющей среды к нагретой обогреваемой среде, в результате чего конечная разность  $\Delta T_{кон} = T_1'' - T_2''$  оказывается значительно меньше начальной.



**Рис. 14.1.** Распределение температур при прямотоке:

1 – греющий теплоноситель; 2 – обогреваемый теплоноситель; 3 – разделительная стенка (“поверхность теплообмена”)

При *противоточной* схеме включения (противоток) (рис. 14.2) теплоносители 1 и 2 движутся вдоль поверхности нагрева 3 в противоположных направлениях так, что входящая в ТА греющая среда отдает теплоту уже подогретой обогреваемой среде, а на выходе остывшая греющая среда отдает теплоту холодной обогреваемой среде. Температуры теплоносителей могут возрастать по направлению движения греющей среды (рис. 14.2, а), оставаться постоянной (рис. 14.2, б) либо уменьшаться (рис. 14.2, в) в зависимости от значения отношения  $W_1/W_2$ .



**Рис. 14.2.** Распределение температур при противотоке:

1-3 то же, что и на рис. 14.1; а –  $G_{1cр1} > G_{2cр2}$ , температурный напор возрастает по ходу греющего теплоносителя; а –  $G_{1cр1} > G_{2cр2}$ , температурный напор вдоль поверхности теплообмена не меняется

При *перекрестной* схеме включения (перекрестный ток) теплоносители 1 и 2 движутся вдоль поверхности нагрева 3 так, что их потоки направлены поперек друг друга. Если поверхность нагрева имеет значительную протяженность “поперек” направления движения теплоносителей, то температура каждого теплоносителя изменяется не только по длине, но и по ширине потока, что сильно усложняет вычисление среднего температурного напора.

Если расходы теплоносителей и коэффициент теплопередачи не изменяются вдоль поверхности теплообмена, то средний температурный напор для прямоточной и противоточной схем включения выражается одинаково через начальные и конечные температурные напоры:

$$\Delta T_{ср} = \frac{\Delta T_{нач} - \Delta T_{кон}}{\ln \frac{\Delta T_{нач}}{\Delta T_{кон}}} \quad (14.6)$$

Здесь  $\Delta T_{\text{нач}}$  и  $\Delta T_{\text{кон}}$  – разность температур теплоносителей в начале и конце поверхности теплообмена соответственно (при противотоке началом условно считается место входа греющего теплоносителя). В случае прямотока

$$\Delta T_{\text{нач}} = T_1' - T_2'; \Delta T_{\text{кон}} = T_1'' - T_2''. \quad (14.7)$$

В случае противотока

$$\Delta T_{\text{нач}} = T_1' - T_2''; \Delta T_{\text{кон}} = T_1'' - T_2'. \quad (14.8)$$

Вычисленный таким образом средний температурный напор называется *средним логарифмическим температурным напором*. Если изменение температуры теплоносителей в ТА незначительно или  $\Delta T_{\text{нач}} \approx \Delta T_{\text{кон}}$ , то вместо среднего логарифмического температурного напора для расчета можно пользоваться его *средним арифметическим* значением:

$$\Delta T_{\text{ср.ар}} = \frac{\Delta T_{\text{нач}} + \Delta T_{\text{кон}}}{2} \quad (14.9)$$

Условие  $\Delta T_{\text{ср.ар}} > \Delta T_{\text{ср}}$  всегда справедливо, но расхождение не превышает 1%, если разность между  $\Delta T_{\text{нач}}$  и  $\Delta T_{\text{кон}}$  не превышает 40%. Если оказывается, что температурные напоры в начале ТА ( $\Delta T_{\text{нач}}$ ) и в конце его ( $\Delta T_{\text{кон}}$ ) мало отличаются друг от друга, то формула (14.9) дает более правильный результат, чем формула (14.6). Это объясняется тем, что неточности измерения температур и неизбежные погрешности округления при вычислениях приводят к большой ошибке при определении  $\Delta T_{\text{ср}}$  по формуле (14.6), если  $\Delta T_{\text{нач}} - \Delta T_{\text{кон}} \approx 0$  и  $\ln \frac{\Delta T_{\text{нач}}}{\Delta T_{\text{кон}}} \approx 0$ .

Прямоточная и противоточная схемы включения имеют разные закономерности изменения температуры теплоносителей вдоль поверхности нагрева.

При прямотоке температуры теплоносителей “идут навстречу” одна другой: понижение температуры греющей среды по направлению ее движения сопровождается повышением температуры обогреваемой среды. Это влечет за собой два важных следствия:

- 1) Максимальная температура подогрева среды при прямотоке не может быть выше минимальной температуры греющей среды;
- 2) Несмотря на наличие большой разности температур по всей поверхности довольно низкая из-за большого значения  $\ln (T_{\text{нач}}/\Delta T_{\text{кон}})$ .

При противотоке разность температур изменяется вдоль поверхности нагрева относительно медленнее, чем при прямотоке, что дает противоточной схеме следующие преимущества:

- 1) Максимальная температура подогрева среды при противотоке может быть близкой к максимальной температуре греющей среды;
- 2) Средний температурный напор при противотоке больше, чем при прямотоке, что позволяет в соответствии с формулой (14.2) либо увеличить количество передаваемой теплоты в данном ТА, либо при проектировании нового ТА уменьшить поверхность его нагрева и тем самым упростить, облегчить и удешевить аппарат.

Единственным преимуществом прямоточной схемы является несколько меньшее значение максимальной температуры поверхности нагрева. Это значение лежит между значениями греющей и обогреваемой сред. Применяя прямоточную схему при

конструировании высокотемпературных теплообменников, облегчают условия работы металла. Однако при этом из-за уменьшения температурного напора увеличиваются габариты теплообменника.

Тепловая эффективность работы ТА характеризуется следующими показателями.

1. Коэффициент теплопередачи  $k_{cp}$  является показателем интенсивности теплопередачи в данном ТА. По своему физическому смыслу он представляет собой количество теплоты, передаваемое через единицу теплообменной поверхности в единицу времени и отнесенное к температурному напору.

Коэффициент теплопередачи весьма сложно зависит от свойств и условий движения обоих теплоносителей, конструктивных особенностей ТА, степени загрязнения поверхности теплообмена и других факторов. Как следует из формулы (14.2), чем выше значение  $k_{cp}$ , тем больше тепловая мощность ТА, или, при заданной мощности, тем меньшими могут быть размеры ТА. При испытании ТА определяют зависимость  $k_{cp}$  от режимных параметров, из которых наиболее сильно на коэффициент теплопередачи влияют расходы теплоносителей.

2. Коэффициент тепловой эффективности  $E$  представляет собой отношение фактической тепловой мощности ТА к предельной мощности, которая была бы достигнута при заданных значениях начальных температур теплоносителей, т. е. при полном использовании температурного напора на входе в ТА или выходе из ТА при противоточной схеме включения:

$$E = \frac{Q}{W_{min}(T'_1 - T'_2)} \quad (14.10)$$

Здесь  $W_{min}$  – наименьшее из значений расходной теплоемкости двух теплоносителей ( $W_1$  и  $W_2$ ). Коэффициент тепловой эффективности характеризует полноту использования теплового потенциала теплоносителей в данном ТА. Его значение всегда меньше единицы; при противоточной схеме оно приближается к единице при бесконечно большой площади поверхности теплообмена, а при прямотоке предельное значение  $E$  зависит от значения отношения расходных теплоемкостей  $W_1/W_2$ .

Расчетные теоретические формулы для коэффициента тепловой эффективности имеют следующий вид:

для прямоточной схемы включения

$$E_{\text{прям}} = \frac{1 - \exp \left[ -\frac{kF}{W_{min}} \left( 1 - \frac{W_{min}}{W_{max}} \right) \right]}{1 + \frac{W_{min}}{W_{max}}}; \quad (14.11)$$

для противоточной схемы включения

$$E_{\text{прот}} = \frac{1 - \exp \left[ -\frac{kF}{W_{min}} \left( 1 - \frac{W_{min}}{W_{max}} \right) \right]}{1 + \frac{W_{min}}{W_{max}} \exp \left[ -\frac{kF}{W_{min}} \left( 1 - \frac{W_{min}}{W_{max}} \right) \right]}, \quad (14.12)$$

где  $W_{min}$  и  $W_{max}$  – меньшее и большее значения из  $W_1$  и  $W_2$ .

3. Число единиц переноса теплоты (ЧЕП)  $N$  входит в выражения (14.11), (14.12) и представляет собой безразмерную форму среднего коэффициента теплопередачи, отнесенного к наименьшей из двух расходных теплоемкостей

$$N = \frac{kF}{W_{min}}. \quad (14.13)$$

Число единиц переноса теплоты характеризует степень приближения данного ТА к термодинамическому пределу его работоспособности: чем больше ЧЕП, тем ближе значение коэффициента тепловой эффективности к его предельному значению.

Следует иметь в виду, что рассмотренные показатели качества ТА характеризуют его только с точки зрения его тепловой работы. Для полной оценки конкретного ТА обязательно учитывать его *гидродинамические* (затраты работы на преодоление сопротивления движению теплоносителей), *габаритные, массовые, стоимостные* и другие характеристики.

### Описание установки

Основными элементами лабораторного стенда, рис 14.3 являются ТА кожухотрубный КТ, с движением горячего теплоносителя по внутренним трубам и холодного теплоносителя в межтрубном пространстве, пластинчатый ПТ и аппарат с воздушным охлаждением ОХ.

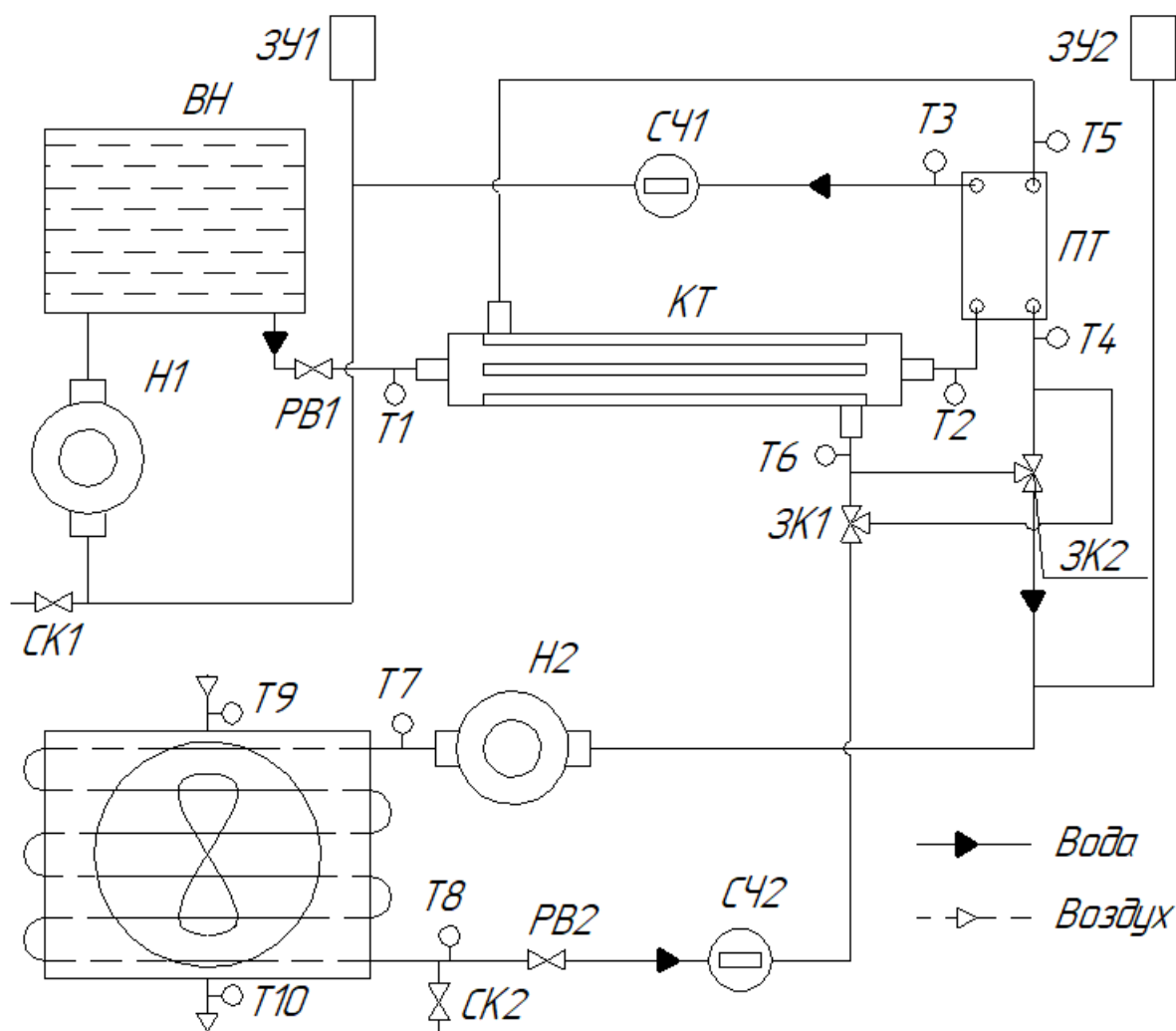


Рис 14.3. – Принципиальная схема лабораторного стенда

## Обозначения

ВН – проточный электронагреватель мощностью до 3,5 кВт с контролируемым по заданной температуре программным регулятором;

ЗУ1 – заливочное устройство горячего теплоносителя с краном Маевского;

ЗУ2 – заливочное устройство холодного теплоносителя с краном Маевского;

КТ – кожухотрубный теплообменный аппарат:

- наружный диаметр внутренней трубы  $d_n = 6$  мм;
- толщина стенки внутренней трубы  $\delta_{ст} = 0,5$  мм;
- количество трубок  $n = 19$  шт;
- шаг между трубками  $S = 8,5$  мм;
- расположение шахматное;
- длина внутренних труб  $l = 330$  мм;
- внутренний диаметр обечайки  $D_{об} = 56$  мм;
- материал теплообменных труб медь МЗр.

ПТ – пластинчатый теплообменный аппарат:

- количество пластин – 12 шт;
- толщина стенки пластин  $\delta_{ст} = 0,45$  мм;
- расстояние между пластинами – 1,4 мм;
- ширина пластина – 73 мм;
- высота пластин – 192 мм;
- площадь теплообмена – 0,12 м<sup>2</sup>;
- материал пластин AISI 304 (08X18H10).

ОХ – воздушный теплообменный аппарат:

СЧ1 – счетчик расхода горячего теплоносителя с импульсным выходом;

СЧ2 – счетчик расхода холодного теплоносителя с импульсным выходом;

Н1 – циркуляционный насос горячего теплоносителя с тремя положениями переключателя, минимального, среднего и максимального расхода воды;

Н2 – циркуляционный насос холодного теплоносителя с тремя положениями переключателя, минимального, среднего и максимального расхода воды;

РВ1 – регулирующий вентиль горячего теплоносителя;

РВ2 – регулирующий вентиль холодного теплоносителя;

ЗК1, ЗК2 – трехходовые запорные краны;

СК1 – сливной кран для замены горячего теплоносителя;

СК2 – сливной кран для замены холодного теплоносителя;

Т1, Т2, Т3, Т4, Т5, Т6, Т7, Т8, Т9, Т10 – температурные датчики.

Для измерения температур теплоносителей служат температурные датчики, установленные в соответствии со схемой лабораторного стенда, рис 14.3.



Таблица 14.1. Номера позиций датчиков температуры в соответствии с (рис. 14.3)

Наименование режима		Прямоток	Противоток
Горячий контур	Номер датчика на входе КТ	T1 = $t_{гн}^k$	
	Номер датчика на выходе КТ	T2 = $t_{гк}^k$	
	Номер датчика на входе ПТ	T2 = $t_{гн}^п$	
	Номер датчика на выходе ПТ	T3 = $t_{гк}^п$	
Холодный контур	Номер датчика на входе КТ	T5 = $t_{хн}^k$	T6 = $t_{хн}^k$
	Номер датчика на выходе КТ	T6 = $t_{хк}^k$	T5 = $t_{хк}^k$
	Номер датчика на входе ПТ	T4 = $t_{хн}^п$	T5 = $t_{хн}^п$
	Номер датчика на выходе ПТ	T5 = $t_{хк}^п$	T4 = $t_{хк}^п$
	Номер датчика на входе ОХ	T7 = $t_{хн}^o$	
	Номер датчика на выходе ОХ	T8 = $t_{хк}^o$	
Воздух	Номер датчика на входе ОХ	T9 = $t_{хн}^k$	
	Номер датчика на выходе ОХ	T10 = $t_{хк}^k$	

Блок управления:

Сеть 220 В – включение электропитания стенда

ВК1 – включение нагрева жидкости в горячем контуре;

ВК2 – включение насоса горячего контура (Н1);

ВК3 – включение насоса холодного контура (Н2) и вентилятора воздушного теплообменного аппарата (ОХ).

Индикаторная лампочка указывает на наличие питания.

**Внимание: Аварийная кнопка должна находиться в отжатом положении.**

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой лабораторной установки и расположением приборов.
2. Подготовить установку к испытаниям теплообменников. Удостовериться, что уровень воды наблюдается в заливочном устройстве не ниже его середины, в противном случае долить жидкость в систему. В системе не допускаются подтеки.
3. Подключить стенд к сети 220 В.
4. Подключить автоматизированный стенд к USB разъему компьютера и запустить программу Пуск → Программы → MeasLAB → «Испытание теплообменников».
5. Включить питание стенда кнопкой «Сеть».
6. Включить переключатель в положение «Прямоток».
7. Кнопкой ВК2 запустить насос Н1 и установить с помощью переключателя на насосе и регулировочного крана РВ средний расход горячего теплоносителя.
8. При включении компьютерной системы измерения клавишей «Пуск» в программе на цифровых индикаторах лицевой панели отображаются мгновенные значения температур, измеряемых всеми датчиками, и графики их изменения по времени.
9. Через 20-30 секунд кнопкой ВК1 включить нагреватель в режим позитивного регулирования.
10. Установить значение температуры 60÷70 °С. **Будьте внимательны, температура в системе не должна превышать 80°С.**
11. Запустить насос Н2, включив кнопку ВК3 и установить с помощью переключателя на насосе минимальный расход холодного теплоносителя.

12. После выхода температуры на заданный режим и установления стационарного теплового режима провести испытания, результаты занести в таблицу.
13. Изменить расход воды методом переключения режимов работы насоса и регулированием положения вентиля, РВ. Снять показания в установившемся режиме, результаты занести в таблицу.
14. Изменить направление подачи холодного теплоносителя, включив переключатель в положение «Противоток» и повторить эксперимент. Снять показания и занести их в таблицу.
15. Отключить установку в порядке обратном включению.
16. Обработать результаты измерений.
17. Предъявить результаты работы преподавателю.

### Обработка результатов измерений.

1. Определить массовый расход горячего и холодного теплоносителей определяется по следующему соотношению

$$G_1 = V_1 \rho_1, G_2 = V_2 \rho_2, \quad (14.14)$$

где  $V_1, V_2$  – объемные расходы горячего и холодного теплоносителей соответственно, определяются с помощью соответствующего счетчика,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$\rho_1, \rho_2$  – плотности горячего и холодного теплоносителей соответственно, принимаются при средней температуре среды в аппарате, см. приложение 1.

2. Определить расчетное количество переданной теплоты как теплоту, полученную холодным теплоносителем:

$$Q = Q_2 = G_2 c_{p2} (T_2' - T_2''), \quad (14.15)$$

Где  $c_{p2}$  – теплоемкость холодного теплоносителя, принимается при средней температуре среды в аппарате, см. приложение 1.

В качестве расчетного принимаем количество теплоты, полученное холодным теплоносителем, поскольку теплота, отданная горячим теплоносителем, определяется с большой погрешностью.

3. Вычислить значения коэффициента теплопередачи для каждого режима:

$$k = \frac{Q}{F \Delta T_{cp}}, \quad (14.16)$$

Где  $F$  – расчетная площадь передающей поверхности кожухотрубного ТА, определяемая по формуле

$$F = \pi d_n n l, \quad (14.17)$$

Где  $d_n$  – наружный диаметр внутренней трубы теплообменника;  $n$  – количество трубок;  $l$  – длина внутренней трубы.

4. Найти расходные теплоемкости теплоносителей:

$$W_1 = G_1 c_{p1}; W_2 = G_2 c_{p2}. \quad (14.18)$$

Где –  $c_{p1}$ ,  $c_{p2}$  – теплоемкости горячего и холодного теплоносителей, принимаются при средней температуре среды в аппарате, см. приложение 1.

5. Рассчитать коэффициент тепловой эффективности ТА как отношение расчетного значения теплоты к предельному:

$$E = \frac{Q_2}{Q_{\text{пред}}} = \frac{Q_2}{W_{\min}(T_1' - T_2')}, \quad (14.19)$$

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

6. Определить число единиц переноса теплоты:

$$N = \frac{kF}{W_{\min}}, \quad (14.20)$$

7. Для режимов № 1, 2 и 3 (прямоток) построить графики изменения коэффициента теплопередачи  $k$  и ЧЕП  $N$  в зависимости от расхода холодного теплоносителя  $G_2$  и изменения коэффициента эффективности  $E$  от  $N$ . Нанести на эти графики точки, соответствующие режиму № 4 (противоток).

8. Используя построенные графики, проанализировать зависимость показателей тепловой работы ТА от режима работы ТА и схемы включения (см. контрольные вопросы).

### Контрольные вопросы

1. Назовите три типа теплообменных аппаратов. Укажите их отличительные признаки.
2. Какие величины характеризуют качество тепловой работы теплообменного аппарата?
3. Что такое средний температурный напор? Коэффициент теплопередачи? Коэффициент тепловой эффективности? Число единиц переноса теплоты? Каков физический смысл этих величин?
4. Назовите три основные схемы включения теплообменных аппаратов по направлениям движения теплоносителей, укажите их отличительные признаки.
5. В чем состоят преимущества и недостатки прямоточной схемы включения по сравнению с противоточной?
6. К какому конструктивному типу относится ТА данной лабораторной установки?
7. Как определяется момент выхода установки на стационарный режим работы?
8. Чем различаются режимы № 1, 2 и 3 при испытании ТА в данной работе?
9. Чем режим № 4 отличается от других режимов?
10. Как в данной работе измеряются расходы теплоносителей?
11. Как изменяются режимы работы ТА?
12. Как определяется количество теплоты, переданной при работе ТА?
13. Какие измерения используются для измерения среднего температурного напора?
14. В каких случаях следует использовать средний арифметический температурный напор?
15. Как влияет схема включения ТА на значение среднего температурного напора?

16. Как влияет увеличение расхода теплоносителя на коэффициент теплопередачи и коэффициент тепловой эффективности? Объясните причины такого влияния.
17. Какими изменениями конструкции или режима работы можно улучшить показатели качества тепловой работы ТА?

## Приложение

### Приложение 1

#### Теплофизические свойства воды на линии насыщения

t, °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , кДж/(кг*К)	$\lambda$ , Вт/(м*К)	$\nu$ , м <sup>2</sup> /с	Pr
0	999,8	4,237	0,551	1,790	13,7
5	999,7	4,224	0,563	1,540	11,3
10	999,6	4,212	0,575	1,300	9,56
15	998,9	4,208	0,586	1,100	8,15
20	998,2	4,204	0,599	1,000	7,06
25	996,9	4,204	0,908	0,910	6,20
30	995,6	4,199	0,618	0,805	5,50
35	993,9	4,199	0,626	0,720	4,85
40	992,2	4,199	0,634	0,659	4,30
45	990,1	4,199	0,641	0,615	3,90
50	988,0	4,199	0,648	0,556	3,56
55	985,6	4,199	0,654	0,515	3,25
60	983,2	4,204	0,659	0,479	3,00
65	980,5	4,208	0,664	0,445	2,75
70	977,7	4,212	0,668	0,415	2,56
75	974,8	4,212	0,671	0,385	2,35
80	971,8	4,216	0,674	0,366	2,23
85	968,5	4,220	0,678	0,347	2,10
90	965,3	4,224	0,680	0,326	1,95
95	961,8	4,224	0,682	0,310	1,85
100	958,3	4,229	0,683	0,295	1,75
110	951,0	4,237	0,685	0,268	1,58
120	943,1	4,250	0,686	0,244	1,43
130	934,8	4,271	0,686	0,226	1,32
140	926,1	4,291	0,686	0,212	1,23

## ЛИТЕРАТУРА

Теория тепломассообмена: Учеб. Для технич. Ун-тов и ВУЗов / С.И. Исаев, И.А. Кожин, В.И. Кофанов и др.; под ред. А.И. Леонтьева. 2-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997.

Лабораторный практикум по термодинамике и теплопередаче: Учеб. Пособие для энергомашиностроит. спец. ВУЗов / В.Н. Афанасьев, А.А. Афонин, С.И. Исаев и др.; Под ред. В.И. Крутова и Е.В. Шишова. М.: Высш. шк., 1988.