

### **3.5. Лабораторная работа: «Исследование коэффициента теплопередачи при вынужденном течении жидкости в трубе круглого сечения»**

#### **3.5.1. Введение**

В данной лабораторной работе рассматривается установка, позволяющая определить средний коэффициент теплопередачи от жидкости к воздуху через гладкую и ребристую стенку при течении жидкости в трубе круглого сечения и в условиях естественной конвекции окружающего воздуха.

Установка так же позволяет определить средний коэффициент теплоотдачи от жидкости к внутренней поверхности трубы и средний коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности трубы в результате конвективного теплообмена к воздуху.

#### **3.5.2. Цели и задачи лабораторной работы**

Целью данной лабораторной работы является исследование коэффициента теплопередачи при вынужденном течении жидкости в трубе круглого сечения.

Задачами исследования являются:

- 1) закрепление теоретических знаний по существующим режимам движения жидкостей и газов в трубах и каналах;
- 2) измерение температур горячего и холодного теплоносителя на входе и на выходе теплообменного аппарата, проведение обработки экспериментальных данных;
- 3) составление отчета по выполненной работе.

#### **3.5.3. Основные теоретические сведения**

##### **3.5.3.1 Гладкая труба**

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

Средний коэффициент теплоотдачи при ламинарном вязкостно-гравитационном режиме течения ( $Re_{ж,d} \leq 2300$ ) и ( $Gr_{ж,d} \cdot Pr_{ж} \geq 8 \cdot 10^5$ ) может быть рассчитан по критериальному уравнению, полученному М. А. Михеевым:

$$\overline{Nu}_{ж,d} = 0,15 \cdot Re_{ж,d}^{0,33} \cdot Pr_{ж}^{0,33} \cdot (Gr_{ж,d} \cdot Pr_{ж})^{0,1} \cdot \varepsilon_t \cdot \overline{\varepsilon}_\ell, \quad (3.5.1)$$

Здесь и далее  $Nu$ ,  $Gr$ ,  $Re$ ,  $Pr$ ,  $Pe$  – критерии подобия.

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. 3.5.1;

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

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

Таблица 3.5.1

$\ell/d$	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

При ламинарном вязкостном режиме течения ( $Re_{ж,d} \leq 2300$ ) и ( $Gr_{ж,d} \cdot Pr_{ж} < 8 \cdot 10^5$ ) средний коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1$  может быть определен по уравнению:

$$\overline{Nu}_{ж,d} = 1,55 \cdot (Pe_{ж,d} \cdot \frac{d}{l})^{0,33} \left( \frac{\mu_c}{\mu_{ж}} \right)^{0,14} \cdot \overline{\varepsilon}_\ell \quad (3.5.2)$$

где  $\mu_c$  - кинематическая вязкость жидкости при температуре стенки,  $\mu_{ж}$  - кинематическая вязкость жидкости при  $t = t_c - 0,5 \Delta t_{cp}$  ( $\Delta t_{cp}$  - средний температурный напор),  $\overline{\varepsilon}_\ell$  принимается равным единице при данном соотношении  $\ell/d$ .

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

$$\overline{Nu}_{ж,d} = 0,021 \cdot Re_{ж,d}^{0,8} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \cdot \varepsilon_t \cdot \overline{\varepsilon}_\ell \quad (3.5.3)$$

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

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

$$\overline{Nu}_{ж,d} = K_0 \cdot Pr_{ж,d}^{0,43} \cdot \varepsilon_t \cdot \overline{\varepsilon}_\ell, \quad (3.5.4)$$

где комплекс  $K_0$  зависит от числа Рейнольдса (табл. 3.5.2), а поправку  $\overline{\varepsilon}_\ell$  рассчитывают так же, как и при турбулентном режиме течения.

Зависимость комплекса  $K_0$  от числа Рейнольдса

Таблица 3.5.2

$Re \cdot 10^{-3}$	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  $\varepsilon_e$   $\varepsilon_t$  в формулах (1), (2),(3) и (4), учитывающую изменение физических свойств среды от температуры, рассчитывают по формуле

$$\varepsilon_t = \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25}, \quad (3.5.5)$$

где  $Pr_{ж}$  принимают по справочным данным для текучей среды при средней температуре жидкости, а  $Pr_c$   $Pr_c$  - при температуре стенки.

Теплоотдача от трубы к воздуху происходит посредством естественной конвекции. При малых температурных напорах вокруг трубы образуется пленка нагретого воздуха. Этот режим называется пленочным. При этом,  $Gr_{ж,d} \cdot Pr_{ж} \leq 1, Nu_{ж,d} = 0,5$  и  $\alpha = 0,5 \cdot \left( \frac{\lambda_{ж}}{d} \right)$ . Теплообмен определяется теплопроводностью воздуха. При увеличении температурного напора возможно разрушение ламинарного течения вокруг трубы. В этом случае расчет коэффициента теплоотдачи производится по критериальной зависимости:

$$\overline{Nu}_{ж,d} = 0,5 \cdot (Gr_{ж,d} \cdot Pr_{ж})^{0,25} \cdot \varepsilon_t$$

Так как  $d_2/d_1 \leq 1,8$ , то коэффициент теплопередачи можно приближённо считать таким же что и через плоскую стенку, а учитывая то, что коэффициент теплопроводности материала стенки (для меди  $\lambda=384$  Вт/м град) много больше чем значение  $\ln(d_2/d_1)$ , можно записать:

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (3.5.6)$$

### 3.5.3.2 Оребренная труба

Тепловой поток через внутреннюю поверхность трубы равен:

$$Q = \alpha_1 (t_{ж1} - t_{с1}) S_1, \quad (3.5.7)$$

где  $S_1 = \pi L d_1$  – площадь внутренней поверхности трубы;

$\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности трубы;

$t_{с1}$  – температура стенки трубы (для медной трубы можно считать, что температура на внутренней поверхности равна (приблизённо) температуре на её внешней поверхности);

$t_{ж1}$  – температура жидкости в трубе;

$L$  – длина трубы.

Тепловой поток через внешнюю оребрённую поверхность трубы равен:

$$Q = \alpha_2 (t_{с2} - t_{ж2}) S, \quad (3.5.8)$$

$\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи на внешней оребрённой поверхности трубы;

$t_{с2}$  – температура стенки трубы;

$t_{ж2}$  – температура воздуха около трубы ( $t_{ж2} = t_0$ );

$S$  – суммарная площадь ребер и поверхности трубы между рёбрами ( $S = S_p + S_2$ );

$S_2$  – площадь внешней поверхности гладкой части трубы равная

$S_2 = \pi d_2 L - \delta \pi d_2 n$  ( $n$  – число ребер;  $\delta$  – толщина ребра);

$S_p$  – площадь поверхности ребер равная

$$S_p = 2n\pi(d_p^2 - d_2^2)/4.$$

Температуру на внешней поверхности трубы можно принять равной температуре на внутренней её поверхности  $t_{с1}$  так как величина термического сопротивления теплопроводности медной тонкостенной трубы на несколько порядков меньше величины термического сопротивления теплоотдачи на внешней ее поверхности.

Средняя по длине температура поверхности рёбер определяется из соотношения:

$$t_c = (t_6 + t_5)/2,$$

Учитывая соотношение (3.5.2) коэффициент теплопередачи через ребристую стенку можно представить в виде:

$$k_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{S_2}{\alpha_2 S}}, \quad (3.5.9)$$

где  $S/S_2$  – коэффициент оребрения.

Количество тепла переносимое жидкостью с учётом массового расхода  $G$  рассчитывается по соотношению:

$$Q = c_p \cdot G \cdot (t_{жс1}^1 - t_{жс1}^2), \quad (3.5.10)$$

$t_{жс1}^1$  – температура воды на входе в гладкую или оребренную трубу;

$t_{жс1}^2$  – температура воды на выходе из гладкой или оребренной трубы.

#### 3.5.4. Контроль знаний студента

Входной теоретический контроль позволяет оценить усвоенные студентом знания и получить допуск к работе.

### 3.5.5. Программа исследования

#### 3.5.5.1. Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки приведена на рис.3.5.1., 3.5.2. На передней панели 1 находится двухканальный измеритель температуры 2 типа ТРМ200, подключённый к восьми хромель-копелевым термопарам ( $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8$ ), через переключатель термопар 13, соединённым с первым каналом измерителя температур. В нижней части панели находятся три выключателя – “Сеть”, “Нагреватель термостата”, “Насос термостата”. Рабочим участком является две медные гладкие 4 и две оребренные 3 труба, соединенные последовательно, через которые циркулирует нагретая в водоподогревателе (термостате) 5 вода. Объёмный расход воды измеряется расходомером 8 (или ротаметром 9 для малых расходов  $G = (8-10)10^{-3}$  л/с). На входном патрубке водоподогревателя (термостата) находится кран  $K_1$ , регулирующий величину объёмного расхода воды в трубах 4 и 3. Циркуляционный насос 10 прокачивает нагретую в водоподогревателе (термостате) воду по трубе 4 и 3. Кран  $K_2$  служит для удаления воздуха из системы при её заполнения водой. Заполнение системы водой производится через расширительный бачёк 11 при открытом кране  $K_1$  и  $K_2$  (или вентиль Маевского).



Рис.35.1. Блок термостата с циркуляционным насосом

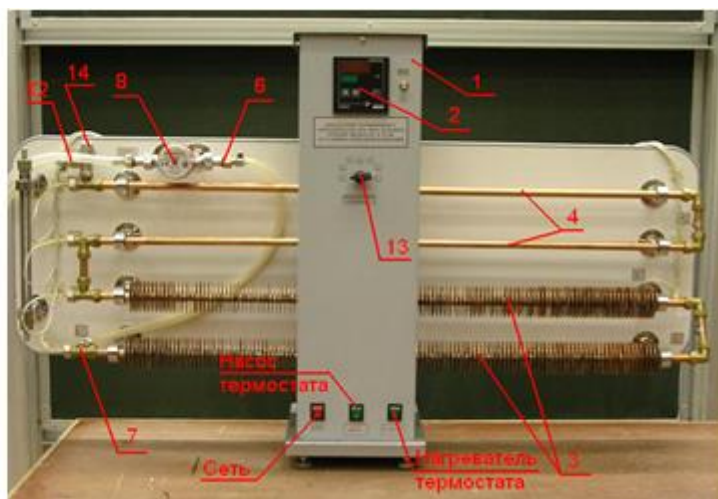


Рис.3.5.2.. Панель управления с рабочим участком установки

Температура жидкости в водоподогревателе (термостате) регулируется в блоке 12 в пределах 25–65 °С. Объёмный расход воды измеряется

расходомером 8 с крыльчаткой и регулируется краном  $K_1$  в пределах 5–40 л/час.

#### **Измеряемые величины:**

$t_1$  – температура воды на входе в оребрённую трубу;

$t_2$  – температура воды на выходе из оребрённой трубы;

$t_3$  – температура воды на входе в гладкую трубу;

$t_4$  – температура воды на выходе из гладкой трубы;

$t_5$  – температура на внешней поверхности оребрённой трубы на ее середине;

$t_6$  – температура на торце ребра на середине трубы;

$t_7$  – температура на внешней поверхности гладкой трубы на ее середине;

$t_8$  – температура воздуха вблизи трубы;

$G$  – массовый расход воды.

#### **3.5.5.2. Подготовка установки к эксплуатации**

Перед первым пуском установки следует:

1. Заземлить установку.
2. Заполнить полностью водоподогреватель (термостат) через расширительный бачёк 11 дистиллированной водой.
3. Соединить шланг 6 с насосом термостата.
4. Закрыть кран  $K_1$  термостата и кран  $K_2$  (или вентиль Маевского 14) выпуска воздуха из системы.
5. Долить воду в расширительный бачок термостата 11 (уровень воды в расширительном бачке термостата должен быть достаточным для заполнения водой циркуляционного насоса, всегда в течение опыта).
6. Включить тумблер «Сеть» и тумблер «Насос термостата».
7. Заполнить систему, постоянно доливая воду в расширительный бачок. Заполнение системы водой определяется по началу вытекания воды из трубки 7.
8. Не выключая насоса, соединить трубку 7 с входом термостата и открыть вентиль  $K_1$ .
9. Если в системе остался воздух, то следует подтянуть хомуты на магистральных соединениях и приоткрыть клапан  $K_2$  (или вентиль Маевского 14) для удаления воздуха из насоса и системы.
10. Закрыть клапан  $K_2$  (или вентиль Маевского 14) и многократно включая и выключая циркуляционный насос добиться полного удаления воздуха из системы.
11. Пункты 9 и 10 повторить при нагревании воды в термостате.

#### **3.5.5.3. Проведение опыта**

После ознакомления с описанием экспериментальной установки необходимо заготовить форму протокола для записи наблюдений.

1. Включить электропитание установки переключателем “Сеть”

2. Включить измеритель температуры 2.
3. Закрыть кран К2 (или вентиль Маевского 14) и открыть кран К1.
4. Включить циркуляционный насос переключателем “Насос термостата”.
5. Установить краном К1 расход воды не более  $(10-15)10^{-3}$  л/с.
6. Включить электрический водоподогреватель (термостат) переключателем “Нагреватель термостата”.
7. При достижении температуры на входе гладкой трубы  $t_1=45-50$  °С измерить температуры  $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8$  и записать в таблицу.
8. По заданию преподавателя перейти на другой режим температуры на входе гладкой трубы  $t_1=50-60$  °С и измерить температуры  $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8$ .
9. Обработать результаты и сравнить экспериментальные значения коэффициентов теплопередачи с теоретическими, полученными по критериальным зависимостям.

### ***3.5.6. Требования к содержанию отчета по работе***

Рекомендуется следующая структура отчета по лабораторной работе:

1. Титульный лист.
2. Задание к лабораторной работе.
3. Описание схемы экспериментальной установки и методики расчёта.
4. Анализ результатов и выводы по работе.