

Лабораторная работа: «Определение среднего коэффициента теплоотдачи при вынужденном ламинарном движении жидкости в круглой трубе»

1. Введение

В данной лабораторной работе рассматривается установка, позволяющая определить средний коэффициент теплоотдачи и тепловой поток от жидкости к внутренней поверхности трубы при течении жидкости в трубе круглого сечения.

2. Цели и задачи лабораторной работы

Целью работы является получение навыков экспериментального определения среднего коэффициента теплоотдачи при вынужденном течении воды 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. Основные теоретические сведения

Данная работа связана с таким физическим явлением как конвективный теплообмен. При движении жидкости процесс переноса теплоты осуществляется одновременно конвекцией и теплопроводностью. Под конвекцией теплоты понимают перенос теплоты при перемещении макрочастиц жидкости в пространстве из области с одной температурой в область с другой температурой. Конвекция возможна только в текучей среде, в которой перенос теплоты неразрывно связан с переносом самой среды.

Конвективный теплообмен между потоком жидкости и поверхностью соприкасающегося с ним тела называется теплоотдачей. Очень часто в инженерных расчетах определяют теплоотдачу, при этом знание конвективного теплообмена внутри жидкой среды может представить косвенный интерес, поскольку перенос теплоты внутри жидкости отражается и на теплоотдаче.

При расчете теплоотдачи используют закон Ньютона-Рихмана

$$dQ = \alpha(t_c - t_{ж})dF$$

Коэффициент пропорциональности α , входящий в уравнение, называется коэффициентом теплоотдачи. Он зависит от конкретных условий процесса теплоотдачи, влияющих на его интенсивность.

Коэффициент теплоотдачи вычисляется на основе критериальных уравнений полученных на основе обработки результатов экспериментальных исследований на различных физико-геометрических моделях для числа Нуссельта. В работе рассматривается модель горизонтального трубчатого радиатора, имеющего внутренний диаметр d и длину l , в котором течет нагретая вода. Средняя температура на внутренней стенке трубки равна t_c , средняя температура воды по длине равна $t_{ж}$.

Для создания ламинарного движения жидкости в круглой трубе необходимо с помощью вентиля К1 установить объемный расход жидкости при котором число Рейнольдса не превышало бы критического значения, т.е. $Re < 2300$.

Для определения режима движения воды вычисляем значение числа Рейнольдса, приняв в качестве определяющей температуры среднеарифметическую температуру жидкости $t_{ж} = 0,5(t_{ж1} + t_{ж2})$, °С. Пользуясь таблицей физических свойств воды на линии насыщения [] при $t_{ж}$ определяется плотность жидкости $\rho_{ж}$, кг/с, коэффициент динамической вязкости $\mu_{ж}$, Па·с и значение числа Re

$$Re = 4G / (\pi d \mu_{ж}).$$

Массовый расход воды можно рассчитать по формуле

$$G = \rho_{ж} V = \rho_{ж} W \pi d^2 / 4, \text{ кг/с,}$$

определив объемный расход воды V , м³/с по расходомеру. Отсюда при необходимости можно выразить среднюю скорость движения жидкости в трубе W , м/с.

Если $Re_{ж} < 2300$, то режим течения воды ламинарный.

Для того чтобы установить, оказывает ли влияние на теплоотдачу естественная конвекция, нужно вычислить значение произведения

$$(Gr Pr)_г = g \beta_{г} (t_{ж} - t_c) d^3 Pr_{г} / \nu_{г}^2,$$

где необходимо знать температуру стенки t_c , а в качестве определяющей температуры принимается температура $t_{г} = 0,5(t_{ж} + t_c)$, °С.

При этой температуре по таблице [] определяются коэффициент кинематической вязкости $\nu_{г}$, температурный коэффициент объемного расширения $\beta_{г}$, число Прандтля $Pr_{г}$.

Если $(GrPr)_r < 8 \cdot 10^5$, то естественная конвекция не оказывает существенного влияния на теплоотдачу и режим течения воды – вязкостный.

Расчет средней теплоотдачи при вязкостном режиме течения жидкости в трубах при постоянной температуре стенки ($t_c = \text{const}$), можно производить по следующей формуле [Петухов Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. М., Энергия, 1967, 411 с.]

$$Nu_r = 1,55(Re_r d / l)^{1/3} (\mu_{ж} / \mu_c)^{0,14} \varepsilon, \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} Nu_r &= \alpha d / \lambda_r, \\ Pr_r d / l &= 4Gc_{pr} / (\pi l \lambda_r), \\ \alpha &= q / (t_{ж} - t_c). \end{aligned}$$

Индексы «с» и «г» означают, что физические свойства жидкости выбираются соответственно при температуре стенки t_c и температуре t_r . Поправка на гидродинамический начальный участок

$$\varepsilon = 0,6 \left(\frac{1}{Re_{ж}} \frac{l}{d} \right)^{-1/7} \left(1 + 2,5 \frac{1}{Re_{ж}} \frac{l}{d} \right).$$

Эта поправка вводится, когда перед обогреваемым участком трубы нет участка гидродинамической стабилизации и

$\frac{1}{Re_{ж}} \frac{l}{d} < 0,1$. В противном случае, если перед обогреваемым участком

трубы имеется участок гидродинамической стабилизации, можно принять $\varepsilon = 1$.

Формула (1) справедлива при $Re_{ж} < 2300$; $\frac{1}{Re_r} \frac{l}{d} \leq 0,05$; $(GrPr)_r \leq 8 \cdot 10^5$;

$0,07 \leq \mu_{ж} / \mu_c \leq 1500$.

По таблице [] определяются физические свойства воды λ_r , c_{pr} , $c_{рж}$, $\rho_{ж}$, $\mu_{ж}$, μ_c и заносятся в таблицу 2 отчета по лабораторной работе.

Если $(GrPr)_r > 8 \cdot 10^5$, то естественная конвекция оказывает влияние на теплоотдачу и режим течения воды – вязкостно-гравитационный.

При вязкостно-гравитационном режиме течения в горизонтальных трубах для расчета средней теплоотдачи можно воспользоваться следующей формулой [Петухов Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. М., Энергия, 1967, 411 с.]

$$Nu_r = 0,8(Re_r d / l)^{0,4} (GrPr)_r^{0,1} (\mu_{ж} / \mu_c)^{0,14}, \quad (2)$$

где число Пекле

$Re_r = Wd / a_r$, коэффициент температуропроводности воды a_r , м²/с выбирается по температуре t_r .

Формула (2) справедлива при $Re_{ж} \leq 2300$; $20 \leq Pe_r \frac{d}{l} \leq 120$; $10^6 \leq (GrPr)_r \leq 13 \cdot 10^6$; $2 \leq Pr_r \leq 10$.

Средний коэффициент теплоотдачи отнести к средней арифметической разности температур между водой и стенкой

$$\alpha = Nu_r \frac{\lambda_r}{d}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Анализ результатов

В отчет следует включить таблицы, содержащие результаты измерений и расчетов.

Таблица 1. Результаты измерений

V , м ³ /мин	t_3 , °С	t_4 , °С	t_7 , °С

Таблица 2. Физические свойства воды при определяющей температуре

$t_{ж} = \dots$ °С	$\rho_{ж}$, кг/м ³	$c_{рж}$, Дж/(кг·К)	$\mu_{ж}$, Па·с
$t_r = \dots$ °С	λ_r , Вт/(м·К)	$c_{рг}$, Дж/(кг·К)	
$t_c = \dots$ °С	μ_c , Па·с		

Таблица 3. Результаты расчетов

W , м/с	$Re_{ж}$	$(GrPr)_r$	Nu_r	α , Вт/(м ² ·К)	Q , Вт

Количество тепла, передаваемого от воды к стенке трубы

$$Q = \alpha(t_{ж} - t_c) \pi dl, \text{ Вт.}$$

С другой стороны, экспериментально определенное количество тепла теряемого потоком жидкости

$$Q^* = Gc_{рж}(t_{ж1} - t_{ж2}), \text{ Вт,}$$

где удельная теплоемкость $c_{pж}$ выбирается по средней температуре жидкости $t_{ж}$.

Вычислить относительную погрешность определения теплового потока передаваемого от воды к стенке трубы по формуле

$$\delta Q = (Q - Q^*)100 / Q^*, \%$$

Сделать вывод о величине расхождения теплового потока, вычисленного на основе критериального уравнения, с тепловым потоком, определенным в опыте.

4. Программа исследования

4.1. 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 оребрённые 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.1. Блок термостата с циркуляционным насосом

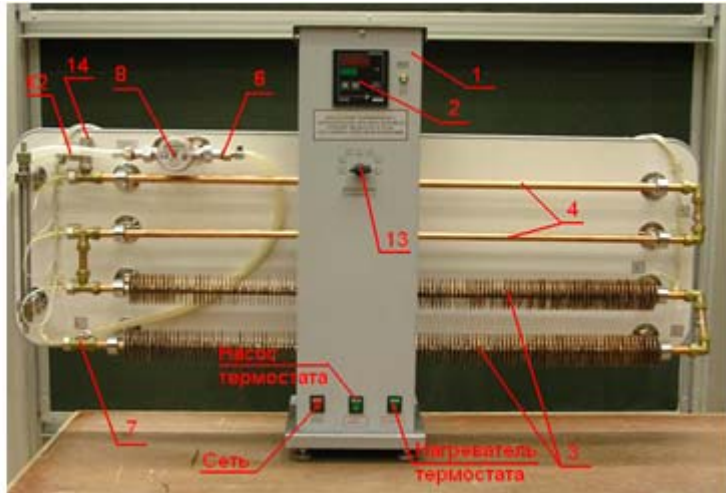


Рис.2. Панель управления с рабочим участком установки

Температура жидкости в водоподогревателе (термостате) регулируется в блоке 12 в пределах 25–65 °С. Объемный расход воды измеряется расходомером 8 с крыльчаткой и регулируется краном К₁ в пределах 5–40 л/час.

Измеряемые величины:

- t_1 – температура воды на входе в оребренную трубу;
- t_2 – температура воды на выходе из оребренной 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 оребренной 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;
- V – объемный расход воды.

Данные установки:

внутренний диаметр медной трубы $d=12 \cdot 10^{-3}$ м;
длина обогреваемого участка трубы $l=2$ м.

4.2. 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, показание расходомера записать в таблицу 1.
6. Включить электрический водоподогреватель (термостат) переключателем “Нагреватель термостата”.
7. При достижении температуры на входе гладкой трубы $t_1=45-50$ °С измерить температуры t_3 , t_4 , t_7 и записать в таблицу 1.
8. Обработать результаты и сравнить экспериментальные значения коэффициентов теплоотдачи с теоретическими, полученными по критериальным зависимостям.

5. 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.

6. Литература

1. Александров А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: справочник / А.А. Александров, Б.А. Григорьев. – М.: Изд-во МЭИ, 2006. – 168 с.
2. Петухов Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. М., Энергия, 1967, 411 с.