

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧЕРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ В.И. ЛЕНИНА»

Кафедра теоретических основ теплотехники

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ
ЧЕРЕЗ ГЛАДКУЮ И ОРЕБРЕННУЮ ТРУБЫ**

Методические указания к выполнению лабораторной работы

Иваново 2010

Составители В.В. Бухмиров

Д.В. Ракутина

Редактор Т.Е. Созинова

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по специальностям теплотехнического профиля 140101, 140103, 140104, 140106 и 220301 и изучающих курс “Тепломассообмен” или “Теплотехника”.

Методические указания содержат краткие сведения из теории теплопередачи, описание экспериментальной установки, методику проведения эксперимента, а также расчетные формулы, необходимые для обработки результатов опыта.

Методические указания утверждены цикловой методической комиссией ТЭФ.

Рецензент

кафедра теоретических основ теплотехники ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»

1. Задание

1. Экспериментально определить коэффициент теплопередачи для гладкой и оребренной труб.

2. Рассчитать коэффициент теплопередачи через стенку гладкой трубы, используя известные критериальные уравнения.

3. Сравнить результаты опытного и расчетного определения коэффициента теплопередачи для гладкой трубы.

4. Сравнить коэффициенты теплопередачи для гладкой и оребренной труб.

2. Краткие сведения из теории теплопередачи

Расчет теплопередачи через гладкую поверхность

Под теплопередачей понимают передачу теплоты от текучей среды с большей температурой (горячего флюида) к текучей среде с меньшей температурой (холодному флюиду) через непроницаемую стенку любой формы. Таким образом, теплопередача включает в себя теплоотдачу от горячего флюида к стенке, теплопроводность внутри стенки и теплоотдачу от стенки к нагреваемому флюиду. Теплоотдача между стенкой и флюидом в общем случае может происходить за счет конвекции и излучения.

Тепловой поток в процессе стационарной теплопередачи не изменяется во времени и не зависит от координат, т.е. является постоянным $Q = \text{const}$.

Расчетная схема теплопередачи через плоскую стенку показана на рис. 1. Тепловой поток через плоскую стенку рассчитывают по формуле

$$Q = k \cdot (T_{f1} - T_{f2}) \cdot F, \quad (1)$$

где Q – тепловой поток, Вт; T_{f1} и T_{f2} – температуры горячего и холодного флюидов, °С (К); k – коэффициент теплопередачи через плоскую стенку, Вт/(м²·К); F – площадь поверхности стенки, м².

Формула для расчета коэффициента теплопередачи через плоскую стенку имеет вид

$$k = \frac{1}{R_{t,1} + R_{t,2} + R_{t,3}} = \frac{1}{1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2}, \quad (2)$$

где $R_{t,1} = 1/\alpha_1$ – термическое сопротивление теплоотдачи от горячего флюида к стенке, (м²·К)/Вт; $R_{t,2} = \delta/\lambda$ – термическое сопротивление теплопроводности плоской стенки, (м²·К)/Вт; $R_{t,3} = 1/\alpha_2$ – термическое сопротивление теплоотдачи от стенки к холодному теплоносителю, (м²·К)/Вт; α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи от горячего флюида к стенке и от стенки к холодному флюиду, Вт/(м²·К); δ – толщина стенки, м; λ – коэффициент теплопроводности стенки, Вт/(м·К).

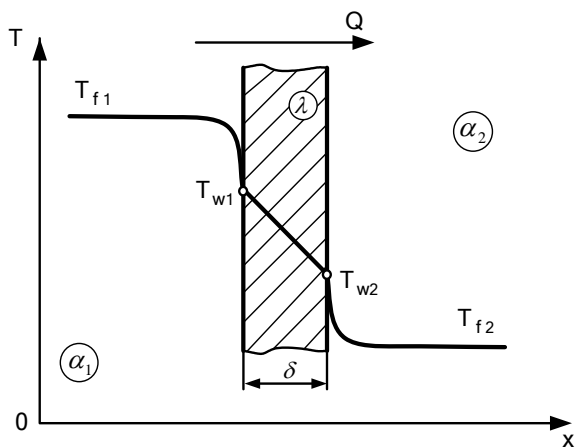


Рис. 1. Теплопередача через плоскую стенку

Расчетная схема теплопередачи через цилиндрическую стенку приведена на рис. 2. Тепловой поток через цилиндрическую стенку рассчитывают по формуле

$$Q = k_{\ell} \cdot \pi \cdot (T_{f,1} - T_{f,2}) \cdot \ell, \quad (3)$$

где k_{ℓ} – линейный коэффициент теплопередачи через цилиндрическую стенку, Вт/(м·К); ℓ – длина цилиндрической стенки, м.

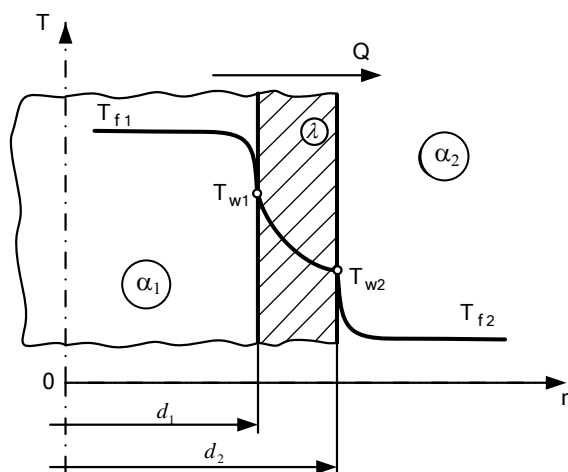


Рис.2. Теплопередача через цилиндрическую стенку

Линейный коэффициент теплопередачи через цилиндрическую стенку определяют по формуле

$$k_{\ell} = \frac{1}{R_{\ell,1} + R_{\ell,2} + R_{\ell,3}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}}, \quad (4)$$

где $R_{\ell,1} = 1/(\alpha_1 \cdot d_1)$ – линейное термическое сопротивление теплоотдачи от горячего флюида к стенке, (м·К)/Вт;

$R_{\ell,2} = 1/(2\lambda) \cdot \ln(d_2/d_1)$ – линейное термическое сопротивление теплопроводности цилиндрической стенки, (м·К)/Вт; $R_{\ell,3} = 1/(\alpha_2 \cdot d_2)$ – линейное термическое сопротивление теплоотдачи от стенки к холодному теплоносителю, (м·К)/Вт; d_1 и d_2 – внутренний и наружный диаметры цилиндрической стенки, м.

Для цилиндрических стенок, у которых $d_2/d_1 \leq 2$, теплопередачу через стенку цилиндрической формы можно рассчитать по формулам теплопередачи для плоской стенки с погрешностью менее 4 %.

Тепловой поток теплопередачи через цилиндрическую стенку в этом случае

$$Q = k \cdot (T_{f1} - T_{f2}) \cdot F^*, \quad (5)$$

где $F^* = \pi \cdot d^* \cdot \ell$ – площадь боковой поверхности цилиндрической стенки, м².

Погрешность упрощенного расчета можно уменьшить, если в качестве расчётного диаметра d^* принимать диаметр со стороны меньшего значения коэффициента теплоотдачи α :

а) если $\alpha_1 \gg \alpha_2 \Rightarrow d^* = d_2$;

б) если $\alpha_2 \gg \alpha_1 \Rightarrow d^* = d_1$;

в) если $\alpha_1 \approx \alpha_2$ (одного порядка) $\Rightarrow d^* = \frac{d_1 + d_2}{2}$.

Коэффициент теплопередачи k рассчитывают по формуле (2). При этом для тонкостенной трубы, изготовленной из высокотеплопроводного материала, термическое сопротивление теплопроводности стенки $R_{t,2} = \delta/\lambda \rightarrow 0$. В этом случае формула (2) значительно упрощается:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (6)$$

Таким образом, для расчета коэффициента теплопередачи необходимо знать коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 , которые можно определить экспериментально по закону Ньютона:

$$\alpha_1 = \frac{Q}{(T_{f1} - T_{w1}) \cdot \pi \cdot d_1 \cdot \ell}, \quad (7)$$

$$\alpha_2 = \frac{Q}{(T_{w2} - T_{f2}) \cdot \pi \cdot d_2 \cdot \ell}, \quad (8)$$

где T_{w1} , T_{w2} – температуры стенки со стороны горячего и холодного теплоносителей (см. рис. 1 и 2), °С (К).

При допущении $R_{t,2} = \delta/\lambda \rightarrow 0$ можно принять равными температуры внутренней и наружной поверхностей трубы $T_{w1} \approx T_{w2} \approx T_w$.

Тепловой поток Q , отдаваемый горячим теплоносителем, рассчитывают по формуле

$$Q = G_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_{f1}^{BX} - T_{f1}^{BЫX}), \quad (9)$$

где $G_1 = \overset{\square}{V}_1 \cdot \rho_1$ – массовый расход горячего теплоносителя, кг/с; $\overset{\square}{V}_1$ – объёмный расход, м³/с; ρ_1 – плотность горячего теплоносителя, кг/м³; c_{p1} – удельная изобарная теплоёмкость горячего теплоносителя, Дж/(кг·К); T_{f1}^{BX} , $T_{f1}^{BЫX}$ – средние по сечению трубы температуры горячего теплоносителя на входе и выходе соответственно, °С (К).

Плотность ρ_1 и удельная изобарная теплоёмкость c_{p1} находят по справочным таблицам [2] при средней температуре горячего теплоносителя $T_{f1} = (T_{f1}^{BX} + T_{f1}^{BЫX})/2$.

Для проверки достоверности результатов экспериментального определения коэффициента теплопередачи необходимо сопоставить опытные и расчетные значения k . Коэффициент теплопередачи через стенку гладкой трубы рассчитывают по формуле (6), в которой коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 определяют по формуле

$$\alpha_i = \alpha_{i,k} + \alpha_{i,l}, \quad (10)$$

где $\alpha_{i,k}$ и $\alpha_{i,l}$ – коэффициенты теплоотдачи конвекцией и излучением, Вт/(м²·К).

Коэффициенты конвективной теплоотдачи $\alpha_{1,k}$ и $\alpha_{2,k}$ находят по известным критериальным уравнениям. Критериальные уравнения представляют собой функциональную связь между определяемыми и определяющими критериями. В задачах конвективного теплообмена определяемым является критерий Нуссельта (Nu), а определяющими критериями – критерий Рейнольдса (Re), критерий Рэлея (Ra) и критерий Прандтля (Pr).

При ламинарном вязкостном режиме течения жидкости в трубе ($Re_1 \leq 2300$) средний коэффициент теплоотдачи $\alpha_{1,k}$ рассчитывают по критериальному уравнению

$$Nu_1 = 1,55 \cdot (Re_1 \cdot Pr_1 \cdot d_1 / \ell)^{1/3} \cdot (\mu_{f1} / \mu_{w1})^{0,14} \cdot \overline{\varepsilon}_\ell, \quad (11)$$

где $Nu_1 = \alpha_{1,k} \cdot d_1 / \lambda_{f1}$ – критерий Нуссельта; $Re_1 = w_1 \cdot d_1 / \nu_1$ – критерий Рейнольдса; Pr_1 – критерий Прандтля; $w_1 = G_1 / (\rho_1 \cdot f_1)$ – скорость движения жидкости, м/с; $f_1 = \pi \cdot d_1^2 / 4$ – площадь поперечного сечения трубы, м²; λ_{f1} – коэффициент теплопроводности текучей среды, Вт/(м·К); ν_1 – кинематический коэффициент вязкости текучей среды, м²/с; ρ_1 – плотность текучей среды, кг/м³; μ_{f1} и μ_{w1} – динамический коэффициент вязкости текучей сре-

ды при температуре флюида T_{f1} и при температуре стенки T_{w1} , Па·с; ε_ℓ – поправка, учитывающая влияние на теплоотдачу гидродинамической стабилизации потока на начальном участке теплообмена:

$$\text{при } \frac{\ell}{\text{Re}_1 \cdot d_1} < 0,1 \quad \overline{\varepsilon}_\ell = 0,6 \cdot \left(\frac{\ell}{\text{Re}_1 \cdot d_1} \right)^{-1/7} \cdot \left(1 + 2,5 \cdot \frac{\ell}{\text{Re}_1 \cdot d_1} \right),$$

$$\text{при } \frac{\ell}{\text{Re}_1 \cdot d_1} \geq 0,1 \quad \overline{\varepsilon}_\ell \approx 1.$$

Физические свойства текучей среды (λ_{f1} , ν_1 , ρ_1 , Pr_1), входящие в критериальное уравнение (11) находят в справочных таблицах [2] при определяющей температуре $T_{01} = 0,5 \cdot (T_{w1} + T_{f1})$.

Средний коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции около горизонтальной трубы $\alpha_{2,k}$ рассчитывают по формуле

$$\text{Nu}_2 = 0,5 \cdot \text{Ra}_2^{0,25} \cdot \left(\frac{\text{Pr}_{f2}}{\text{Pr}_{w2}} \right)^{0,25}, \quad (12)$$

где $\text{Nu}_2 = \alpha_{2,k} \cdot d_2 / \lambda_{f2}$ – критерий Нуссельта;

$$\text{Ra}_2 = \frac{g \cdot d_2^3}{\nu_2^2} \cdot \beta_2 \cdot \Delta T \cdot \text{Pr}_{f2} \text{ – критерий Рэлея; } \Delta T = |T_{w2} - T_{f2}|$$

– модуль разности температур между стенкой и флюидом, °С (К); $g = 9,8 \text{ м}^2/\text{с}$ – ускорение свободного падения;

λ_{f2} – коэффициент теплопроводности текучей среды, Вт/(м·К); ν_2 – кинематический коэффициент вязкости текучей среды, м²/с;

β_2 – коэффициент объемного расширения флюида, 1/К; Pr_{f2} и Pr_{w2} – критерий Прандтля для теку-

чей среды при температуре флюида T_{f2} и при температуре стенки T_{w2} .

В формуле (12) физические свойства текучей среды (λ_{f2} , ν_2) находят в справочных таблицах [2] при определяющей температуре $T_{02} = T_{f2}$.

Коэффициент объемного расширения для капельных жидкостей приведен в справочниках [2] в зависимости от температуры флюида, а для газов его рассчитывают по формуле

$$\beta_2 = \frac{1}{T_{02}}, \quad (13)$$

где T_{02} – определяющая температура в **Кельвинах!**

В лабораторной работе перенос теплоты от воды к внутренней поверхности трубы осуществляется конвекцией, поэтому коэффициент теплоотдачи излучением при течении жидкости внутри трубы $\alpha_{1,l} = 0$.

Коэффициент теплоотдачи излучением от внешней поверхности трубы к окружающему воздуху рассчитывают по формуле

$$\alpha_{2,l} = \frac{\varepsilon_w \cdot \sigma_o \cdot (T_{w2}^4 - T_{f2}^4)}{T_{w2} - T_{f2}}, \quad (14)$$

где ε_w – степень черноты материала стенки; $\sigma_o = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана; T_{w2} и T_{f2} – температуры поверхности и флюида в **Кельвинах!**

Заметим, что коэффициент теплопередачи не может быть больше меньшего из коэффициентов теплоотдачи, т.е. $k \leq \min(\alpha_1, \alpha_2)$, поэтому для увеличения коэффициента теплопередачи необходимо увеличивать меньший коэффициент теплоотдачи. Одним из способов интенсификации

теплопередачи является увеличение поверхности теплообмена за счет ее оребрения.

Расчет теплопередачи через оребренную поверхность

Тепловой поток через цилиндрическую оребренную с внешней стороны стенку, при условии $d_2 / d_1 \leq 2$, рассчитывают по формуле

$$Q_{op} = k_{op} \cdot (T_{f1}^{op} - T_{f2}) \cdot F, \quad (15)$$

где Q_{op} – тепловой поток, передаваемый через оребренную стенку, Вт; T_{f1}^{op} и T_{f2} – температуры горячего и холодного флюидов, °С (К); k_{op} – коэффициент теплопередачи через оребренную стенку, Вт/(м²·К); F – площадь внутренней гладкой поверхности трубы, м².

При допущении $\delta/\lambda \rightarrow 0$ коэффициент теплопередачи через оребренную стенку рассчитывают по формуле

$$k_{op} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1^{op}} + \frac{1}{\alpha_2^{op} \cdot \varphi}}, \quad (16)$$

где α_1^{op} – коэффициент теплоотдачи на внутренней гладкой поверхности трубы, Вт/(м²·К); α_2^{op} – коэффициент теплоотдачи на внешней оребренной поверхности трубы, Вт/(м²·К); $\varphi = F_{op} / F \geq 1$ – коэффициент оребрения; F_{op} – площадь оребренной поверхности, м².

Площадь оребренной поверхности

$$F_{op} = \pi \cdot d_2 \cdot (\ell_{op} - \delta_p \cdot N) + N \cdot \pi \cdot (d_p^2 - d_2^2) / 2, \quad (17)$$

где d_2 – наружный диаметр оребренной трубы, м; d_p – диаметр ребра, м; ℓ_{op} – длина оребренной трубы, м; N – число ребер; δ_p – толщина ребра, м.

Площадь внутренней гладкой поверхности оребренной трубы

$$F = \pi \cdot d_1 \cdot \ell_{op}, \quad (18)$$

где d_1 – внутренний диаметр оребренной трубы, м.

Коэффициенты теплоотдачи α_1^{op} и α_2^{op} можно определить экспериментально по закону Ньютона:

$$\alpha_1^{op} = \frac{Q_{op}}{(T_{f1}^{op} - T_{w1}^{op}) \cdot F}, \quad (19)$$

$$\alpha_2^{op} = \frac{Q_{op}}{(T_{w2}^{op} - T_{f2}) \cdot F_{op}}, \quad (20)$$

где T_{w1}^{op} – температура внутренней гладкой поверхности оребренной трубы, °С (К); T_{w2}^{op} – температура внешней поверхности оребренной трубы, °С (К).

Тепловой поток Q_{op} , отдаваемый горячим теплоносителем, рассчитывают по формуле

$$Q_{op} = G_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_{f1}^{op, \text{вх}} - T_{f1}^{op, \text{вых}}), \quad (21)$$

где $G_1 = V_1 \cdot \rho_1$ – массовый расход горячего теплоносителя, кг/с; V_1 – объёмный расход горячего теплоносителя, м³/с; ρ_1 – плотность горячего теплоносителя, кг/м³; c_{p1} – удельная изобарная теплоёмкость горячего теплоносителя, Дж/(кг·К); $T_{f1}^{op, \text{вх}}$, $T_{f1}^{op, \text{вых}}$ – средние по сечению трубы температуры горячего теплоносителя для оребренной трубы на входе и выходе, °С (К).

Плотность ρ_1 и удельная изобарная теплоёмкость c_{p1} находят по справочным таблицам [2] при средней температуре горячего теплоносителя $T_{f1}^{op} = (T_{f1}^{op, \text{вх}} + T_{f1}^{op, \text{вых}}) / 2$.

3. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки показана на рис. 3. На передней панели **1** расположен цифровой измеритель температуры **2**, к которому подключены восемь хромель-копелевых термопар ($T_1 \div T_8$). Термопары последовательно подключаются к измерителю температуры с помощью переключателя **3**.

T_1 и T_2 – температуры воды на входе и выходе из гладкой трубы;

T_3 и T_4 – температуры воды на входе и выходе из оребренной трубы;

T_5 – температура поверхности гладкой трубы на входе;

T_6 – температура поверхности соединительной части труб;

T_7 – температура поверхности оребренной трубы на выходе;

T_8 – температура поверхности ребра.

В нижней части передней панели находятся выключатели "Сеть", "Водоподогреватель" и "Насос".

Рабочий участок установки состоит из гладкой **4** и оребренной **5** медных труб, соединенных последовательно. Длина гладкой трубы $\ell = 1090$ мм, оребренной – $\ell_{op} = 900$ мм. Внутренний диаметр обеих труб $d_1 = 13$ мм, наружный – $d_2 = 15$ мм. На оребренной трубе расположено 104 ребра наружным диаметром $d_p = 60$ мм и толщиной $\delta_p = 0,9$ мм.

По трубам **4** и **5** циркулирует вода, нагретая в водоподогревателе **6**. На выходном патрубке водоподогревателя находится циркуляционный насос **7**. Объемный расход воды измеряется ротаметром **8** или расходомером **9** и регулируется краном K_1 в пределах 5...40 л/ч. Водоподогреватель может нагреть воду от 25 до 80 °С. Расширительный бачок **10** служит для удаления воздуха из системы и для заполнения системы водой.

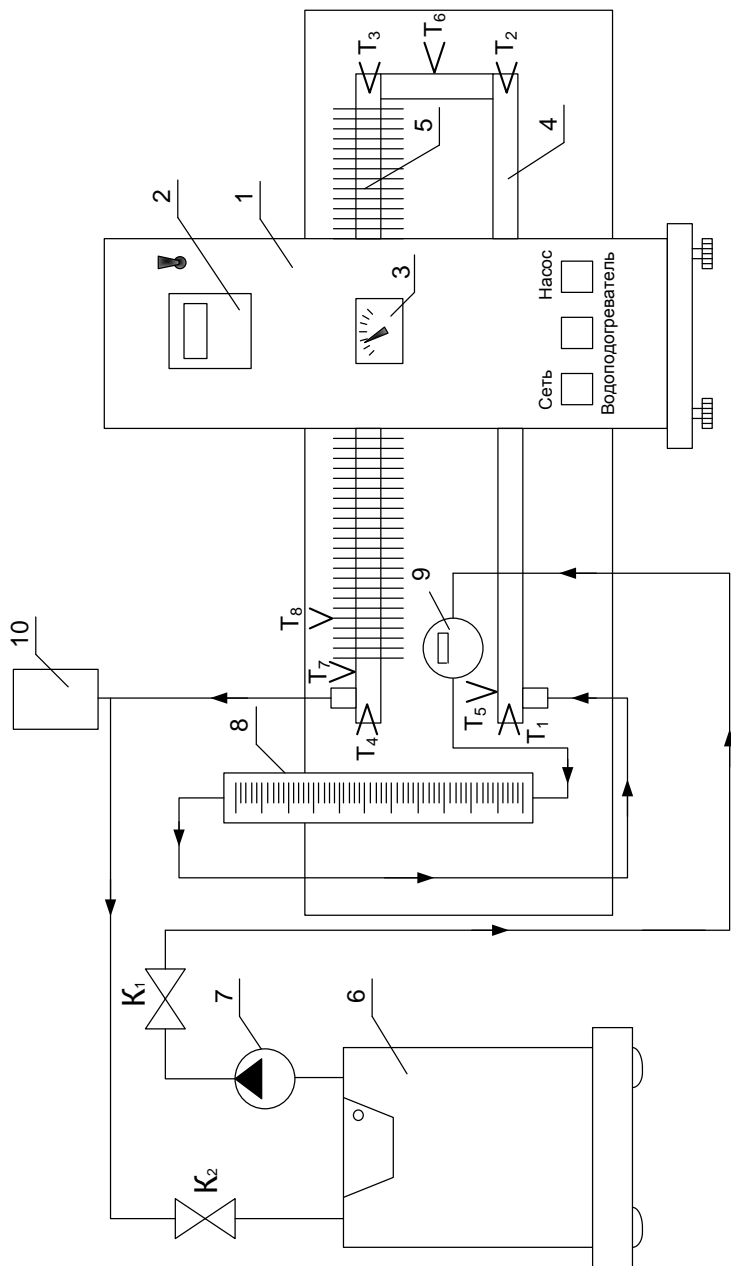


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

4. Порядок проведения эксперимента

1. Изучить устройство экспериментальной установки и подготовить журнал наблюдений. О готовности к проведению эксперимента сообщить преподавателю.

2. Включить электропитание установки переключателем "Сеть".

3. Включить циркуляционный насос переключателем "Насос". Медленно открывая кран K_1 , установить объёмный расход воды в пределах от 10 до 40 л/ч по указанию преподавателя.

4. Включить электрический водоподогреватель $\mathbf{6}$ переключателем "Водоподогреватель".

5. Включить двухканальный измеритель температуры $\mathbf{2}$.

6. После того как сигнальная лампочка на водоподогревателе $\mathbf{6}$ погаснет, измерить расход воды и температуры $T_1 \div T_8$. Результаты измерений занести в журнал наблюдений. Температуру окружающего воздуха T_B измеряют ртутным термометром, установленным в лаборатории.

7. Об окончании опыта сообщить преподавателю и подписать у него журнал наблюдений.

Журнал наблюдений

\square $V_1,$ m^3/c	$T_1,$ $^{\circ}C$	$T_2,$ $^{\circ}C$	$T_3,$ $^{\circ}C$	$T_4,$ $^{\circ}C$	$T_5,$ $^{\circ}C$	$T_6,$ $^{\circ}C$	$T_7,$ $^{\circ}C$	$T_8,$ $^{\circ}C$	$T_B,$ $^{\circ}C$

5. Обработка результатов эксперимента

Определение коэффициента теплопередачи через гладкую трубу

1. Рассчитать тепловой поток Q , отдаваемый горячей водой, по формуле (9), в которой температура воды на входе в трубу $T_{f1}^{BX} = T_1$, а на выходе $T_{f1}^{ВЫХ} = T_2$.

Физические свойства воды определяют по табл. 11 [2] при средней температуре $T_{f1} = (T_{f1}^{BX} + T_{f1}^{ВЫХ})/2$.

2. По формулам (7) и (8) определить коэффициент теплоотдачи от воды к стенке трубы α_1 и от стенки к окружающему воздуху α_2 .

Так как для медной трубы термическое сопротивление теплопроводности стенки $R_{t,2} = \delta/\lambda \rightarrow 0$, то приближенно можно считать $T_{w1} \approx T_{w2} \approx T_w$. При этом средняя температура стенки гладкой трубы $T_w = (T_5 + T_6)/2$, а температура холодного флюида $T_{f2} = T_b$.

3. Рассчитать коэффициент теплопередачи k от воды к воздуху через гладкую трубу по формуле (6).

Расчет коэффициента теплопередачи через гладкую трубу по известным методикам

1. Рассчитать критерий Нуссельта Nu_1 при ламинарном режиме течения воды в трубе по формуле (11). Физические свойства воды (λ_{f1} , ν_1 , ρ_1 , Pr_1) находят по табл. 11 [2] при определяющей температуре T_{01} .

Замечание. В данной лабораторной работе объемный расход воды не превышает 40 л/ч, что соответствует ламинарному режиму течения ($Re_1 \leq 2300$). Критериальные уравнения для расчета турбулентного ($Re_1 > 10^4$) и пере-

ходного ($2300 < Re_1 \leq 10^4$) от ламинарного к турбулентному режимов течения приведены в [1].

2. Рассчитать коэффициент теплоотдачи от воды к стенке гладкой трубы:

$$\alpha_1^{\text{расч}} = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_{f1}}{d_1}. \quad (22)$$

3. Рассчитать критерий Нуссельта Nu_2 при свободной конвекции воздуха около горизонтальной трубы по формуле (12). Физические свойства воздуха (λ_{f2}, ν_2) находят по табл. 9 [2] при определяющей температуре T_{02} .

4. Определить коэффициент конвективной теплоотдачи от стенки гладкой трубы к воздуху:

$$\alpha_{2,к} = \frac{Nu_2 \cdot \lambda_{f2}}{d_2}. \quad (23)$$

5. По формуле (14) рассчитать коэффициент теплоотдачи излучением от стенки гладкой трубы к воздуху $\alpha_{2,л}$. Степень черноты меди находят по табл. 21 [2].

6. Найти суммарный коэффициент теплоотдачи от поверхности гладкой трубы к воздуху:

$$\alpha_2^{\text{расч}} = \alpha_{2,к} + \alpha_{2,л}. \quad (24)$$

7. Найти расчётное значение коэффициента теплопередачи через стенку гладкой трубы:

$$k^{\text{расч}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1^{\text{расч}}} + \frac{1}{\alpha_2^{\text{расч}}}}. \quad (25)$$

8. Сравнить опытное и расчетное значения коэффициента теплопередачи:

$$\varepsilon = (k^{\text{оп}} - k^{\text{расч}}) / k^{\text{расч}} \cdot 100 \% , \quad (26)$$

где $k^{\text{оп}}$ – коэффициент теплопередачи, полученный в Вашем опыте; $k^{\text{расч}}$ – коэффициент теплопередачи, рассчитанный по известным методикам.

*Определение коэффициента теплопередачи
через оребренную трубу*

1. Рассчитать тепловой поток Q , отдаваемый горячей водой, по формуле (21), в которой температура воды на входе в трубу $T_{f1}^{\text{оп,вх}} = T_3$, а на выходе $T_{f1}^{\text{оп,вых}} = T_4$.

Физические свойства воды определяют по табл. 11 [2] при средней температуре $T_{f1}^{\text{оп}} = (T_{f1}^{\text{оп,вх}} + T_{f1}^{\text{оп,вых}}) / 2$.

2. По формулам (19) и (20) определить коэффициент теплоотдачи от воды к внутренней поверхности трубы $\alpha_1^{\text{оп}}$ и от внешней оребренной поверхности к окружающему воздуху $\alpha_2^{\text{оп}}$.

Среднюю температуру внутренней и внешней поверхностей оребренной трубы рассчитывают по формулам

$$T_{w1}^{\text{оп}} = (T_6 + T_7) / 2 \quad \text{и} \quad T_{w2}^{\text{оп}} = (T_7 + T_8) / 2 .$$

Температура холодного флюида $T_{f2} = T_b$.

3. Рассчитать коэффициент теплопередачи $k_{\text{оп}}$ от воды к воздуху через оребренную трубу по формуле (16).

4. Сравнить коэффициенты теплопередачи для гладкой и оребренной труб.

Журнал обработки результатов эксперимента

Гладкая труба							Оребренная труба		
α_1 ,	$\alpha_1^{\text{расч}}$,	α_2 ,	$\alpha_2^{\text{расч}}$,	k ,	$k^{\text{расч}}$,	ε ,	$\alpha_1^{\text{оп}}$,	$\alpha_2^{\text{оп}}$,	$k_{\text{оп}}$,
$\frac{Вт}{м^2К}$	$\frac{Вт}{м^2К}$	$\frac{Вт}{м^2К}$	$\frac{Вт}{м^2К}$	$\frac{Вт}{м^2К}$	$\frac{Вт}{м^2К}$	%	$\frac{Вт}{м^2К}$	$\frac{Вт}{м^2К}$	$\frac{Вт}{м^2К}$

Отчет о выполнении лабораторной работы должен содержать:

- задание на выполнение лабораторной работы;
- принципиальную схему экспериментального стенда;
- журнал наблюдений;
- обработку результатов эксперимента;
- выводы по работе.

6. Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятий теплопередача, теплоотдача, теплопроводность.
2. Изобразите график изменения температуры при теплопередаче через плоскую стенку.
3. Изобразите график изменения температуры при теплопередаче через цилиндрическую стенку.
4. Напишите уравнения теплопередачи через плоскую и цилиндрическую стенки. Поясните входящие в них величины.
5. При каком условии процесс теплопередачи через цилиндрическую стенку допускается рассчитывать по формулам теплопередачи через плоскую стенку?
6. Поясните отличие уравнений теплопередачи для гладкой и оребренной труб.
7. Напишите формулу для расчета коэффициента теплопередачи через гладкую трубу.
8. Напишите формулу для расчета коэффициента теплопередачи через оребренную трубу.
9. Напишите формулы для расчета термического сопротивления теплопроводности и теплоотдачи при теплопередаче через плоскую стенку.
10. Напишите формулы для расчета термического сопротивления теплопроводности и теплоотдачи при теплопередаче через цилиндрическую стенку.
11. Опишите методику экспериментального определения коэффициента теплопередачи для гладкой и оребренной труб.
12. С какой целью применяют оребрение поверхности?
13. Поясните алгоритм расчета коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции около горизонтальной трубы.

14. Поясните алгоритм расчета коэффициента теплоотдачи при вынужденном движении флюида в трубе.

15. Назовите режимы вынужденного движения флюида в трубах.

16. Дайте определение критерия подобия. На какие группы подразделяют критерии подобия?

17. Перечислите известные Вам определяемые критерии подобия.

18. Перечислите известные Вам определяющие критерии подобия.

19. Дайте определение критериального уравнения.

20. Напишите формулу и поясните физический смысл критерия Нуссельта.

21. Напишите формулу и поясните физический смысл критерия Рейнольдса.

22. Напишите формулу и поясните физический смысл критерия Грасгофа.

23. Напишите формулу и поясните физический смысл критерия Рэлея.

24. Напишите формулу и поясните физический смысл критерия Прандтля.

25. Поясните принцип работы экспериментальной установки.

26. Поясните назначение элементов экспериментальной установки.

Библиографический список

1. **Исаченко, В.П.** Теплопередача: Учеб. для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
2. **Краснощеков, Е.А.** Задачник по теплопередаче: Учеб. пособие для вузов. – 4-е изд., перераб. / Е.А. Краснощеков, А.С. Сукомел. – М.: Энергия, 1981. – 240 с.
3. **Ройзен, Л.И.** Тепловой расчет ребренных поверхностей / Л.И. Ройзен, И.Н. Дулькин. – М.: Энергия, 1977. – 256 с.

Содержание

1. Задание	3
2. Краткие сведения из теории теплопередачи	3
3. Экспериментальная установка.....	13
4. Порядок проведения эксперимента.....	15
5. Обработка результатов эксперимента.....	16
6. Контрольные вопросы	20
Библиографический список	22

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ
ЧЕРЕЗ ГЛАДКУЮ И ОРЕБРЕННУЮ ТРУБЫ

Методические указания к выполнению лабораторной работы

Составители: БУХМИРОВ Вячеслав Викторович
РАКУТИНА Дарья Валерьевна
Редактор Н.Б. Михалева

Подписано в печать Формат 60×84¹/₁₆.
Печать плоская. Усл.печ.л.1,4. Тираж 100 экз. Заказ №
ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический
университет им. В.И. Ленина»
Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34