

Министерство образования науки Российской Федерации
Нижекамский химико-технологический институт (филиал)
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Казанский национальный исследовательский технологический университет»

К.А. Сагдеев, Ф.М. Гумеров

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

**Нижекамск
2013**

УДК 536.24

С 14

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Нижнекамского химико-технологического института (филиала) ФГБОУ ВПО «КНИТУ».

Рецензенты:

Биктагиров В.В., кандидат химических наук, доцент;

Визгалов С.В., кандидат технических наук, доцент.

Сагдеев, К.А.

С 14 Теплотехнический эксперимент : методические указания / К.А. Сагдеев, Ф.М. Гумеров. – Нижнекамск : Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ», 2013. – 52 с.

Методические указания подготовлены в соответствии с требованиями ГОС ВПО для подготовки инженеров по направлению 651100 «Техническая физика» специальности 070200 «Техника и физика низких температур» (по ОКСО 140401). В работе наряду с классической теорией тепло- и массообмена рассмотрены вопросы, посвященные методам и технике теплотехнического эксперимента и измерений. Учебный материал изложен в виде четырех отдельных лабораторных занятий, которые включают необходимый теоретический материал и экспериментальную часть.

Предназначены для студентов очно-заочной формы обучения, обучающихся по специальности «Техника и физика низких температур» и могут быть использованы студентами других специальностей при изучении дисциплин теплотехнического профиля.

Подготовлены на кафедре «Техника и физика низких температур» НХТИ ФГБОУ ВПО «КНИТУ».

УДК 536.24

© Сагдеев К.А., Гумеров Ф.М., 2012

© Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ», 2012

ВВЕДЕНИЕ

Практически любая деятельность специалистов (проектирование, эксплуатация, исследование), объектом которой являются теплотехнические устройства, требует сведений о тепло- и массообмене. С одной стороны, эта область науки достаточно хорошо изучена, получены надежные данные, которые можно использовать при решении тех или иных конкретных задач, возникающих при проектировании и эксплуатации современного теплотехнического и теплоэнергетического оборудования. С другой стороны, эта область проблемная, поскольку увеличение мощности энергетических объектов, использование новых веществ, расширение диапазона действия теплотехнических устройств требуют создания новых, более надежных методов расчета, проведения новых исследований. В ряде случаев единственно возможным методом исследования является экспериментальный, причем существенной особенностью теплотехнического эксперимента является его большая трудоемкость и сравнительно невысокая точность, а также то, что он проводится в основном на установках индивидуального изготовления.

Поэтому в данной работе наряду с классической теорией тепло- и массообмена рассмотрены вопросы, посвященные методам и технике теплотехнического эксперимента и измерений, а также приведен значительный по объему табличный материал, содержащий теплофизические свойства веществ.

Для экспериментального исследования процессов теплообмена методом имитационного моделирования создан специальный стенд (рис. 1), на котором путем замены рабочего участка имеется возможность проведения ряда лабораторных работ.

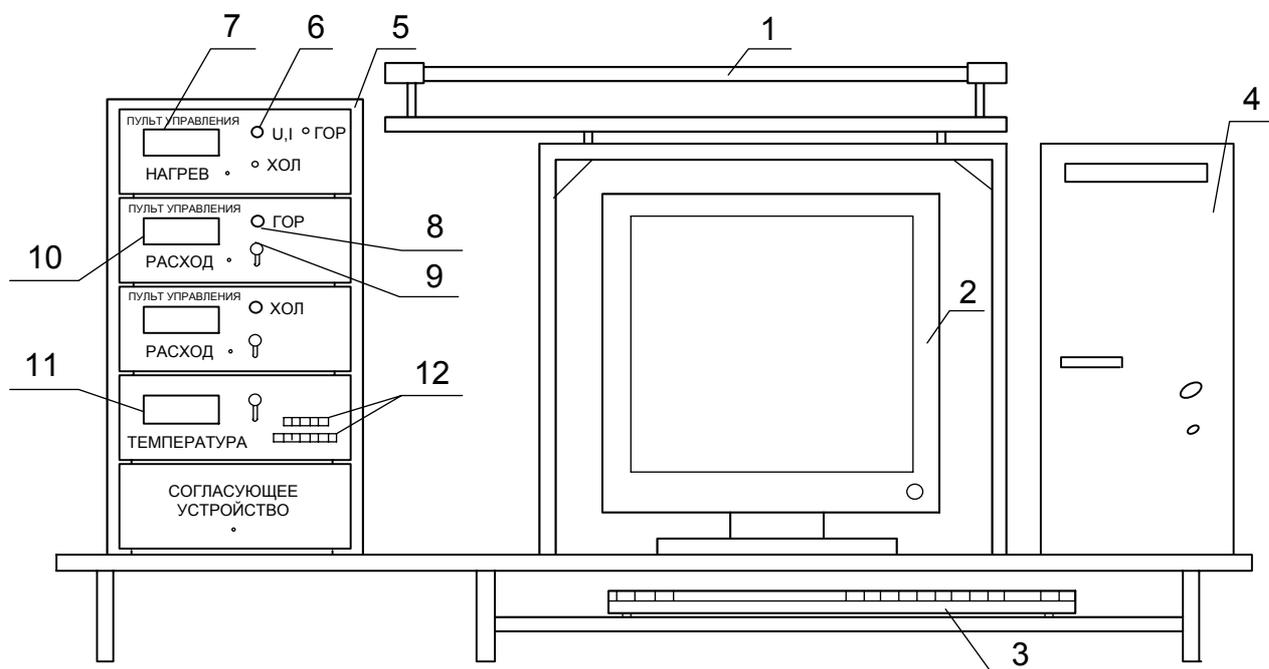


Рис. 1. Общий вид пульта управления и контрольно-измерительных устройств экспериментального стенда: 1 – рабочий участок; 2 – монитор; 3 – клавиатура; 4 – системный блок; 5 – блок управления и контрольно-измерительных приборов; 6 – регулятор нагрева; 7 – индикаторный прибор нагрева; 8 – регулятор расхода горячего теплоносителя; 9 – тумблер переключения датчиков расхода и давления горячего теплоносителя; 10 – индикаторный прибор измерения расхода и давления горячего теплоносителя; 11 – индикаторный прибор измерения температуры; 12 – панель переключения датчиков температуры.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

Исследование теплоотдачи при естественной конвекции около горизонтального цилиндра методом имитационного моделирования процесса теплообмена

Цель работы: экспериментально определить коэффициент теплоотдачи на поверхности горизонтально расположенного цилиндра при естественной конвекции в неограниченном пространстве и сопоставить результаты экспериментов с расчетными данными.

ОСНОВЫ ТЕОРИИ

Конвективный теплообмен

Конвективный теплообмен - процесс переноса тепла, происходящий в движущихся средах (жидкостях либо газах) и обусловленный совместным действием двух механизмов переноса тепла — собственно конвективного переноса и теплопроводности. Таким образом, в случае конвективного теплообмена распространение тепла в пространстве осуществляется за счёт переноса тепла при перемещении текучей среды из области с более высокой температурой в область с меньшей температурой, а также за счёт теплового движения микрочастиц и обмена кинетической энергией между ними.

В связи с тем, что в процессах конвективного теплообмена важную роль играет конвективный перенос, эти процессы должны в значительной мере зависеть от характера движения жидкости, то есть от значения и направления скорости среды, от распределения скоростей в потоке, от режима движения жидкости (ламинарное течение либо турбулентное). При больших (сверхзвуковых) скоростях движения газа на процессы конвективного теплообмена начинает влиять распределение давления в потоке. Если движение жидкости обусловлено действием некоторого внешнего побудителя (насоса, вентилятора, компрессора и т.п.), то такое движение называют вынужденным, а происходящий при этом процесс конвективного теплообмена — вынужденной конвекцией. Если движение жидкости вызвано наличием неоднородного поля температуры, а следовательно, и неоднородной плотности в среде, то

такое движение называют свободным или естественным, а процесс конвективного теплообмена — свободной или естественной конвекцией. На практике встречаются и такие случаи, когда приходится учитывать как вынужденную, так и свободную конвекцию.

Для описания конвективной теплоотдачи используется формула:

$$q = \alpha \cdot (T_0 - T), \quad (1)$$

где q — плотность теплового потока на поверхности, Вт/м²; α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·град); T_0 и T — температуры среды (жидкости или газа) и поверхности соответственно, К.

Величину $T_0 - T$ часто обозначают ΔT и называется температурным напором. Коэффициент теплоотдачи α характеризует интенсивность процесса теплоотдачи; он возрастает при увеличении скорости движения среды и при переходе от ламинарного режима движения к турбулентному в связи с интенсификацией конвективного переноса. Он также всегда больше для тех сред, у которых выше коэффициент теплопроводности. Коэффициент теплоотдачи существенно повышается, если на поверхности происходит фазовый переход (например, испарение или конденсация), всегда сопровождающийся выделением (поглощением) скрытой теплоты. На значение коэффициент теплоотдачи сильное влияние оказывает массообмен на поверхности.

Основной и наиболее трудной проблемой в расчётах процессов конвективной теплоотдачи является нахождение коэффициента теплоотдачи α . Современные методы описания процесса конвективного теплообмена, основанные на теории пограничного слоя, позволяют получить теоретические (точные или приближённые) решения для некоторых достаточно простых ситуаций. В большинстве же встречающихся на практике случаев коэффициент теплоотдачи определяют экспериментальным путём. При этом как результаты теоретических решений, так и экспериментальные данные обрабатываются методами теории подобия и представляются обычно в следующем безразмерном виде: $Nu = f(Re, Pr)$ — для вынужденной конвекции, $Nu = f(Gr, Pr)$ — для свободной конвекции, где $Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda}$ - число Нуссельта, характеризующее конвективный теплообмен

между средой и поверхностью стенки (L — характерный размер потока, λ — коэффициент теплопроводности); $Re = \frac{W \cdot L}{\nu}$ - число Рейнольдса, характеризующее соотношение сил инерции и внутреннего трения в потоке (W — характерная скорость движения среды, ν — кинематический коэффициент вязкости); $Pr = \frac{\nu}{a}$ - число Прандтля, определяющее соотношение интенсивностей термодинамических процессов (a — коэффициент температуропроводности); $Gr = \frac{g \cdot L^3 \cdot \beta \cdot \Delta T}{\nu^2}$ - число Грасгофа, характеризующее соотношение архимедовых сил, сил инерции и внутреннего трения в потоке (g — ускорение свободного падения, β — термический коэффициент объёмного расширения).

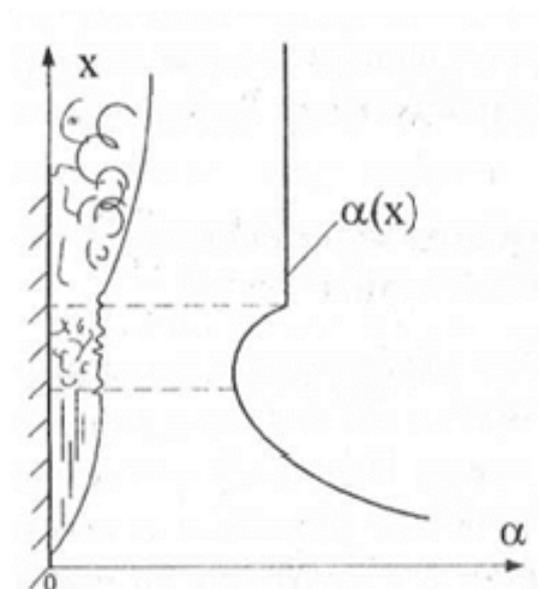
Процессы конвективного теплообмена чрезвычайно широко распространены в технике (энергетике, холодильной технике, ракетной технике, металлургии, химической технологии), а также в природе (перенос тепла в атмосфере, в морях и океанах).

Теплоотдача при свободном движении воздуха около нагретой горизонтальной трубы

Свободная конвекция возникает при перемещении масс среды под действием подъемных сил, образующихся в объеме из-за разности плотностей холодных и нагретых частиц среды. Например, при соприкосновении воздуха с нагретым телом в процессе теплоотдачи воздух нагревается, становится легче (уменьшается его плотность ρ) и поднимается вверх. Если же тело холоднее воздуха, тогда, наоборот, от соприкосновения с ним воздух охлаждается, становится тяжелее (плотность увеличивается) и опускается вниз. Поскольку движение воздуха возникает без внешнего воздействия, этот процесс называют еще и естественной конвекцией.

При свободном движении среды около нагретого твердого тела в пограничном слое температура жидкости изменяется от t_c до $t_{ю}$, а скорость - от нуля у стенки, проходит через максимум и на большом удалении от стенки снова равна нулю. Вначале толщина нагретого слоя мала и течение жидкости имеет плавный струйчатый, ламинар-

ный характер. По мере движения толщина слоя увеличивается, и при определенном ее значении течение среды становится неустойчивым, волновым и затем переходит в неупорядоченно-вихревое, турбулентное с отрывом вихрей от стенки. С изменением характера движения изменяется и интенсивность теплоотдачи. При ламинарном движении вследствие увеличения толщины пограничного слоя коэффициент теплоотдачи α по направлению движения убывает, при переходном движении α резко возрастает и затем при турбулентном α по высоте остается постоянным (рис. 1).



В развитии свободного движения форма тела играет второстепенную роль. Здесь большее значение имеют протяженность поверхности тела, вдоль которой происходит движение, и ее расположение в пространстве. Описанная картина движения жидкости (среды) вдоль вертикальной стенки (или вдоль вертикальной трубы) типична также и для горизонтальных труб и тел овальной формы.

Рис. 1. Изменение коэффициента теплоотдачи при свободном движении воздуха вдоль вертикальной стенки

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Рабочий участок представляет собой металлическую трубу, изготовленную из нержавеющей стали и расположенную горизонтально. Геометрические размеры трубы могут изменяться в следующих пределах: толщина стенки $\delta = 0,5 \div 1,0$ мм, наружный диаметр трубы $d = 20 \div 50$ мм, длина трубы $L = 0,5 \div 1,0$ м. Нагрев рабочего участка осуществляется посредством пропускания по нему переменного электрического тока низкого напряжения, который подводится к зажимам, установленным на концах трубы.

Схема рабочего участка для исследования теплообмена при естественной конвекции около горизонтальной трубы приведена на рис. 2.

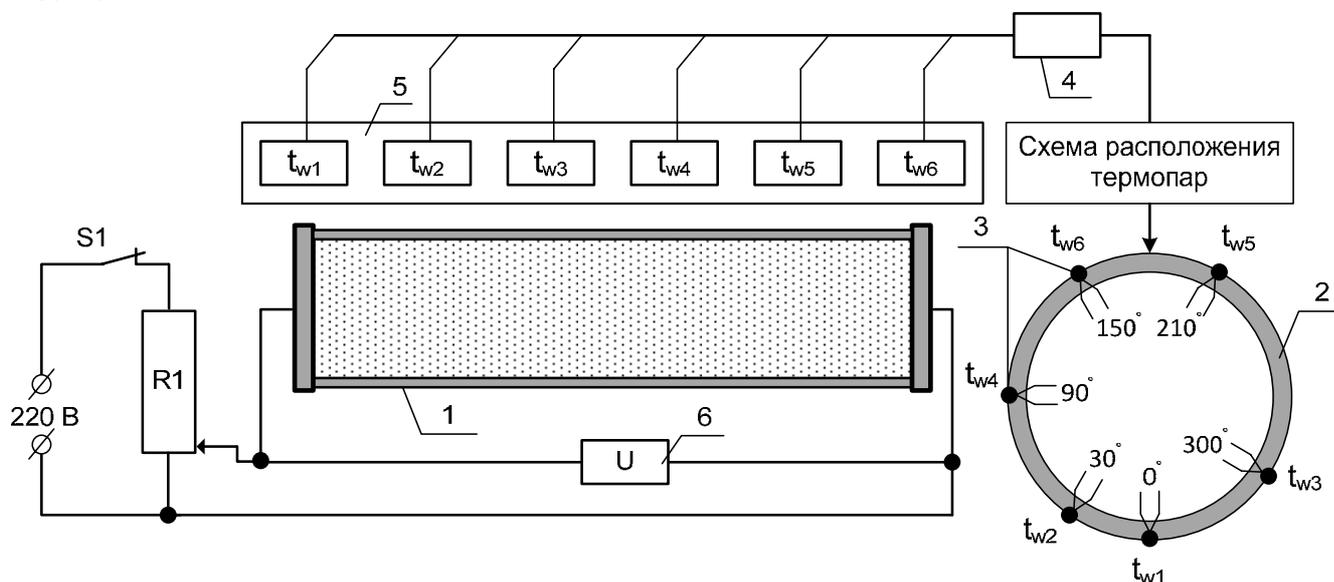


Рис. 2. Схема рабочего участка с системами электрического питания и измерения: 1 – рабочий участок; 2 – поперечное сечение рабочего участка; 3 – датчики температур; 4 – переключатель датчиков температур; 5 – регистрирующий прибор для измерения температур; 6 – вольтметр.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

После включения установки в сеть, введения и запуска рабочей программы на мониторе высвечивается тема лабораторной работы и имеется возможность задать мощность нагрева рабочего участка изменением подаваемого напряжения.

На мониторе отображается картина течения конвективных потоков, возникающая около горизонтально расположенного цилиндра под действием естественной конвекции.

В рекомендованном диапазоне изменения геометрических параметров рабочего участка выбирается один из вариантов геометрических характеристик рабочего участка (d , L , δ). Включаются тумблер питания измерительных приборов и тумблер электронагрева рабочего участка. Для контроля интенсивности нагрева исследуемого цилиндра переключатель датчиков температур 4 устанавливается в положении t_{w6} , соответствующее максимальной

температуре поверхности. Плавным вращением регулятора нагрева устанавливаются выбранные режимы нагрева, что контролируется цифровым индикатором нагрева 5. Эксперименты проводят на стационарном тепловом режиме. С помощью переключателя 4 по регистрирующему прибору 5 определяется распределение температуры по контуру поперечного сечения рабочего участка. Плавно вращая регулятор электрообогрева рабочего участка и контролируя максимальную его температуру, устанавливают три режима.

Результаты эксперимента заносятся в таблицу 1

Таблица 1. Протокол измерений

№ режима	U	T _f	Показания термомпар по сечению трубы											
			t _{w1}	T _{w1}	t _{w2}	T _{w2}	t _{w3}	T _{w3}	t _{w4}	T _{w4}	t _{w5}	T _{w5}	t _{w6}	T _{w6}
	B	K	mV	K	mV	K	mV	K	mV	K	mV	K	mV	K
1														
2														
3														

Для измерения температуры окружающего воздуха T_f предусмотрен термометр.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рассматриваемых условиях эксперимента теплота Q, выделенная на рабочем участке в результате пропускания по нему электрического тока, отдается в окружающую среду как посредством естественной конвекции Q_к, так и посредством излучения Q_и. Поэтому теплота, отдаваемая поверхностью трубы посредством конвекции Q_к, определяется как разность между теплотой Q, выделяемой электрическим током и теплотой Q_и, отдаваемой посредством лучистого теплообмена, т.е. Q_к = Q - Q_и и соответственно плотность теплового потока q_w определится как q_w = Q_к/S, где S – площадь наружной поверхности трубы.

1. Определяются температуры трубы по сечению T_{w1} – T_{w6}:

$$T_w = \frac{t_w}{0,0695} + T_f, K.$$

2. Определяется теплота, выделенная на рабочем участке в результате пропускания по нему электрического тока:

$$Q = \frac{U^2}{R}, \quad \text{Вт},$$

где U – напряжение электрического тока, подаваемое на рабочий участок и измеряемое вольтметром, В; R – электросопротивление трубы, Ом.

$$R = \frac{\rho \cdot l}{F},$$

где ρ – удельное электросопротивление материала трубы, Ом·м; l – длина трубы, м; F – площадь поперечного кольцевого сечения трубы, м²;

Для нержавеющей стали ρ определяется в зависимости от температуры:

$$\rho = 7,5 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{\bar{T}_w}{273} \right)^{0,236},$$

где \bar{T}_w – средняя температура трубы, К: $\bar{T}_w = (T_{w1} + T_{w2} + T_{w3} + T_{w4} + T_{w5} + T_{w6})/6$.

Площадь поперечного кольцевого сечения трубы определяется:

$$F = \frac{\pi}{4} \cdot (d^2 - d_0^2),$$

где d – наружный диаметр трубы, м; $d_0 = d - 2 \cdot \delta$ – внутренний диаметр трубы, м.

3. Определяется теплота, отдаваемая поверхностью трубы в окружающее пространство посредством излучения, согласно закону Стефана-Больцмана:

$$Q_u = 5,67 \cdot \varepsilon \cdot S \cdot \left[\left(\frac{\bar{T}_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_f}{100} \right)^4 \right], \quad \text{Вт},$$

где ε – степень черноты поверхности трубы (см. приложение табл.2), $S = \pi \cdot d \cdot l$ – площадь наружной поверхности трубы, м².

4. Определяется плотность теплового потока на поверхности трубы, обусловленная теплообменом посредством естественной конвекции:

$$q_w = \frac{Q_K}{S} = \frac{Q - Q_u}{\pi \cdot d \cdot l}, \quad \frac{Вт}{м^2}.$$

5. Определяется среднее (по контуру поперечного сечения трубы) значение коэффициента теплоотдачи для каждого температурного режима по формуле Ньютона-Рихмана:

$$\bar{\alpha} = \frac{q_w}{\overline{T_w} - T_f}, \quad \frac{Вт}{м^2 \cdot К}.$$

Расчетное определение коэффициента теплоотдачи

6. Определяются критерии подобия Nu_f , Gr_f , Pr_f :

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda_f},$$

$$Pr = \frac{\nu_f}{a_f}, \text{ для воздуха можно принять } Pr = 0,7,$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (\overline{T_w} - T_f) \cdot d^3}{\nu_f^2},$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; λ_f и ν_f – соответственно коэффициент теплопроводности и кинематический коэффициент вязкости воздуха, определяются в зависимости от температуры среды T_f , β – термический коэффициент объемного расширения, который для газов определяется как: $\beta = \frac{1}{T_f}, \frac{1}{К}$.

Для горизонтальных труб при $10^3 < (Gr \cdot Pr)_{жс} < 10^8$ рекомендуется уравнение подобия:

$$Nu_{жс} = \frac{1}{2} \cdot (Gr_{жс} \cdot Pr_{жс})^{0,25} \cdot (Pr_{жс}/Pr_{см})^{0,25}.$$

Для газов можно принять $Pr_{жс}/Pr_{см} = 1$.

7. По найденному значению Nu определяется расчетный коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_{расч} = \frac{Nu \cdot \lambda_f}{d}.$$

8. Полученные расчетные значения $\alpha_{расч}$ сравниваются с экспериментальными $\bar{\alpha}$ и определяется относительная погрешность δ :

$$\delta = \left| \frac{\bar{\alpha} - \alpha_{расч}}{\bar{\alpha}} \right| \cdot 100\%.$$

9. Результаты расчетов сводятся в таблицу 2.

Таблица 2. Результаты обработки опытных и расчетных данных

№ режима	$\bar{Q},$ Вт	$\bar{Q}_w,$ Вт	$\frac{q_w,$ Вт}{м ² }	$\bar{T}_w,$ К	$(Gr \cdot Pr)_f$	Nu_f	$\bar{\alpha},$ $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$	$\alpha_{расч},$ $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$	$\delta,$ %
1									
2									
3									

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

Определение теплопроводности твердых материалов методом пластины при имитационном моделировании процесса теплообмена

Цель работы: экспериментально определить коэффициент теплопроводности фторопласта методом плоского слоя в зависимости от температуры и сопоставить результаты экспериментов с табличными данными.

ОСНОВЫ ТЕОРИИ

Теплопроводность – процесс переноса теплоты, протекающий на молекулярном уровне при столкновении и соударении микрочастиц, имеющих различную температуру. Осуществляется в твердых телах, диэлектриках путем упругих колебаний кристаллической решетки, в газах – путем диффузии атомов и молекул, в металлах – путем диффузии свободных электронов.

Совокупность значений температуры всех точек тела в данный момент времени представляет температурное поле

$$t=f_1(x,y,z,\tau), \quad (1)$$

где t – температура тела, x, y, z – пространственные координаты точки, τ – время.

Уравнение (1) является уравнением нестационарного трехмерного температурного поля. Если в теле во времени температура не изменяется, то получается стационарное температурное поле:

$$t=f_2(x,y,z). \quad (2)$$

Геометрическое место точек, имеющих одинаковую температуру, образует изотермическую поверхность.

Изменение температуры в пространстве характеризуется градиентом температуры. Градиент температуры – вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону увеличения температуры и равный частной производной температуры по этому направлению:

$$\text{grad}t = \frac{\partial t}{\partial n}, \quad \frac{\text{град}}{\text{м}}. \quad (3)$$

Количество тепла, переносимое за единицу времени через произвольную изотермическую поверхность площадью F , называется тепловым потоком Q .

Тепловой поток, приходящийся на единицу площади изотермической поверхности, носит название плотности теплового потока q :

$$q = \frac{dQ}{dF}, \quad \frac{Вт}{м^2}. \quad (4)$$

Закон Фурье

В установившемся режиме плотность теплового потока пропорциональна градиенту температуры:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}t, \quad (5)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, характеризующий способность вещества проводить теплоту, $Вт/(м \cdot К)$.

Коэффициент теплопроводности является физическим свойством вещества и зависит от его природы, температуры и в меньшей степени от давления. Коэффициент теплопроводности изменяется в следующих пределах:

- 1) для газов $\lambda = 0,005 \div 0,5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. С увеличением температуры λ возрастает. Такой же эффект вызывает увеличение давления. Однако его влияние намного слабее, оно становится заметным при низких (менее $2 \cdot 10^3 \text{ Па}$) и высоких (более $2 \cdot 10^8 \text{ Па}$) давлениях;
- 2) для капельных жидкостей $\lambda = 0,08 \div 0,7 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. С повышением температуры λ обычно уменьшается (исключение составляют вода и глицерин);
- 3) для твердых тел $\lambda = 0,02 \div 400 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. Нижняя часть этого диапазона $0,02-3,00 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ относится к диэлектрикам; материалы с $\lambda < 0,2 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ используются как теплоизоляционные. Повышение температуры приводит к росту λ диэлектриков. Значения $\lambda = 20 \div 400 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ характерны для металлов и их сплавов. Сплавы отличаются меньшей теплопроводностью по сравнению с чистыми металлами, причем даже незначительные примеси могут вызывать существенное уменьшение значения λ . Для большинства чистых металлов λ

уменьшается с ростом температуры, тогда как у сплавов он увеличивается.

Таблица 1. Коэффициент теплопроводности λ , $Вт/(м \cdot К)$ веществ при различных температурах

Вещество	λ при температурах	
	$t = 0^\circ C$	$t = 200^\circ C$
Аммиак (г)	0,021	0,049
Гексан (ж)	0,132	0,081
Серебро	410	362
Бронза	40	54

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

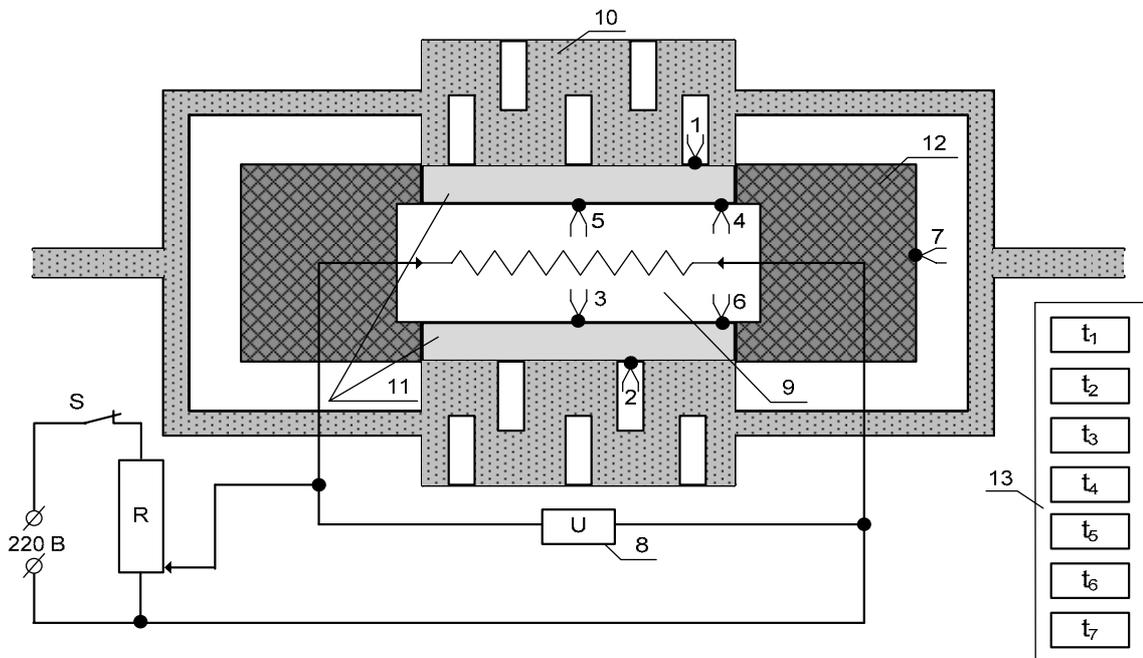


Рис.1. Схема рабочего участка установки: 1-7 – температурные датчики; 8 – вольтметр; 9 – нагреватель, 10 – холодильник; 11 – фторопластовые образцы; 12 – теплоизолирующий кожух; 13 – индикаторный прибор, регистрирующий термо-ЭДС термопар.

Рабочий участок создан по аналогии с реальным и отображается на мониторе. Он состоит из двух фторопластовых образцов, выполненных в форме дисков толщиной $\delta = 5,0$ мм и диаметром $d = 140$ мм. Образцы помещены между нагревателем, высотой $h_n = 12$ мм и диаметром $d_n = 146$ мм и холодильником, охлаждаемым водой.

Создание теплового потока осуществляется нагревательным элементом с электрическим сопротивлением $R = 41 \text{ Ом}$ и холодильником со спиральными канавками для направленной циркуляции охлаждающей воды. Таким образом, тепловой поток, проходящий через исследуемые фторопластовые образцы, уносится затем через холодильник водой. Часть теплоты от нагревателя уходит через торцевые поверхности в окружающую среду, поэтому для уменьшения этих радиальных потерь предусмотрен теплоизоляционный кожух, выполненный из асбоцемента. Кожух высотой $h_k = 22 \text{ мм}$ выполнен в виде полого цилиндра с внутренним диаметром $d_n = 146 \text{ мм}$ и внешним диаметром $d_k = 190 \text{ мм}$.

Переключатель температурных датчиков позволяет последовательно измерить термо-ЭДС всех семи температурных датчиков. Термопара 7 установлена на внешней поверхности теплоизоляционного кожуха для определения тепловых утечек через изоляционный кожух.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

После включения установки в сеть, введения и запуска рабочей программы, на мониторе высвечивается тема лабораторной работы и имеется возможность задать мощность нагрева рабочего участка изменением подаваемого напряжения. В процессе работы с рабочей программой осуществляется следующая последовательность действий:

1. Выбирается температурный режим работы установки: задается с помощью клавиатуры температура горячей поверхности пластин t_2 в пределах от $35 \text{ }^\circ\text{C}$ до $120 \text{ }^\circ\text{C}$ с учетом значащих цифр, высвечиваемых на мониторе.

2. На пульте установки, последовательно включаются тумблеры питания индикаторных приборов, регистрирующих напряжение на электронагревателе U , термо-ЭДС температурных датчиков и тумблер включения нагрева.

3. Плавно вращая ручку реостата устанавливается нужное напряжение на нагревателе. Следует иметь в виду, что реостат выполнен в шаговом варианте, поэтому напряжение изменяется ступенчатым образом.

4. Путем последовательного опроса датчиков температур с помощью переключателя, определяются значения термо-ЭДС семи температурных датчиков, которые вместе со значением U заносятся в протокол измерений (табл.2). Регистрация показаний производится по индикаторным приборам на пульте управления, показания которых дублируются на мониторе.

5. По окончании эксперимента производится перевод всех регулирующих приборов в исходное положение.

Таблица 2. Протокол измерений

№ режима	U	T_f	Показания термопар													
			t_1	T_1	t_2	T_2	t_3	T_3	t_4	T_4	t_5	T_5	t_6	T_6	t_7	T_7
	B	K	mV	K	mV	K	mV	K	mV	K	mV	K	mV	K	mV	K
1																
2																
3																

Для измерения температуры окружающего воздуха T_f предусмотрен термометр.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Определяются температуры фторопластовых пластин и кожуха $T_1 - T_7$:

$$T = \frac{t}{0,0695} + T_f, K.$$

2. Определяются средние температуры внутренней горячей и внешней холодной поверхностей образцов:

$$T_{\Gamma} = \sum_{i=3}^6 \frac{T_i}{4},$$

где i – номер термопары.

$$T_X = \frac{T_1 + T_2}{2}.$$

3. Определяется коэффициент теплопроводности фторопласта:

$$\lambda = \frac{Q \lambda \cdot \delta}{2F \cdot (T_{\Gamma} - T_X)},$$

где Q_λ – тепловой поток, прошедший через образцы за счет теплопроводности, Вт; $F = \pi \cdot r^2$ – площадь поверхности одного образца, м² (r – радиус образца, м).

Тепловой поток Q_λ получается за счет вычитания из общего теплового потока Q , создаваемого нагревателем, тепловых потерь через кожух:

$$Q_\lambda = Q - Q_x;$$

$$Q = \frac{U^2}{R};$$

$$Q_x = k \cdot (T_\Gamma - T_T)$$

Здесь k характеризует теплопроводность кожуха и с учетом того, что кожух имеет цилиндрическую форму можно определить его приблизительное значение:

$$k = \frac{5\pi \cdot \lambda_k}{2} \cdot \left(\frac{d_H + d_K}{d_K - d_H} \right) \cdot (h_H + h_K),$$

где $R = 41 \text{ Ом}$; λ_k – теплопроводность материала кожуха (см. приложение табл.1); T_T – температура наружной поверхности кожуха, определяемая седьмой термопарой.

Полученные значения коэффициента теплопроводности фторопласта сравниваются с табличными данными и определяется относительная погрешность δ :

$$\delta = \left(\frac{\lambda_{\text{табл}} - \lambda}{\lambda} \right) \cdot 100\%.$$

Значение теплопроводности λ зависит от температуры материала, поэтому полученное значение следует отнести к средней температуре исследуемого образца $\bar{T} = 0,5 \cdot (T_\Gamma + T_X)$. Результаты обработки опытных данных сводятся в таблицу 2. Для других режимов работы установки проводятся аналогичные расчеты, в результате чего получится несколько значений λ_j для соответствующих средних температур \bar{T}_j , где j – режим работы установки. По полученным

значениям теплопроводности λ_j следует получить аналитическую зависимость теплопроводности от температуры $\lambda = f(T)$. Приближенно эту зависимость можно выразить в виде линейной функции:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot (1 + b \cdot \bar{T}).$$

В работе требуется определить значения λ_0 и b . Для их нахождения необходимо иметь результаты обработки, как минимум, двух экспериментов с разными температурными режимами. Для определения λ_0 и b по двум экспериментам используется система уравнений:

$$\begin{aligned} \lambda_j &= \lambda_0 \cdot (1 + b \cdot \bar{T}_j) \\ \lambda_{j+1} &= \lambda_0 \cdot (1 + b \cdot \bar{T}_{j+1}) \end{aligned}$$

Из решения этой системы уравнений получается:

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_{j+1} - \frac{\lambda_j \cdot \bar{T}_{j+1}}{\bar{T}_j}}{1 - \frac{\bar{T}_{j+1}}{\bar{T}_j}}; \quad b = \frac{\lambda_j - \lambda_0}{\lambda_0 \cdot \bar{T}_j}.$$

Таблица 2 – Результаты обработки опытных данных

№ режима	$U, В$	$T_A, К$	$T_D, К$	$\bar{T}, К$	$\lambda_j, \frac{Вт}{м \cdot К}$	$\lambda_0, \frac{Вт}{м \cdot К}$	$b, \frac{1}{К}$
1							
2							
3							

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

Определение коэффициента излучения электропроводящих материалов калориметрическим методом при имитационном моделировании процесса теплообмена

Цель работы: экспериментально определить коэффициент излучения электропроводящего материала в зависимости от температуры.

ОСНОВЫ ТЕОРИИ

Тепловое излучение сопровождается переносом внутренней энергии излучающего тела в пространстве путем электромагнитных волн. Электромагнитные волны представляют собой электромагнитные возмущения, исходящие от излучающего тела и распространяющиеся в вакууме со скоростью света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Природа теплового излучения отлична от переноса теплоты в процессах конвективного теплообмена и теплопроводности. Носителями теплового излучения являются электромагнитные волны, которые знакомы под названием космического излучения, γ -излучения, рентгеновского излучения, ультрафиолетового излучения, излучения видимой части спектра, инфракрасного излучения, радиоизлучения.

Природа всех этих излучений одна и та же, разница заключается лишь в длине волны данного излучения. Рассмотрим излучения, которые поглощаются телами, при этом энергия излучения переходит в тепловую энергию. Такими свойствами обладают излучения видимой части спектра (0,4 - 0,8 мкм), инфракрасное излучение (0,8 мкм - 0,8 мм). Процесс распространения инфракрасного излучения в пространстве называют тепловым излучением.

Спектры излучения

Большинство твердых тел и жидкостей имеют сплошные спектры излучения. Излучения их являются достаточно интенсивными, поэтому в процессах излучения и поглощения участвуют тонкие поверхностные слои. Для неметаллов этот слой может быть порядка 1 мм, для металлов ≈ 1 мкм.

Чистые металлы в окисленном состоянии и газы обладают выборочным (селективным) излучением и поглощением, т.е. излучают и поглощают энергию только в определенных интервалах длин волн. Вне этих интервалов излучение и поглощение отсутствует.

Интенсивность излучения газов существенно меньше по сравнению с излучением твердых тел, поэтому в процессах излучения и поглощения участвует вся толщина газового слоя. Значение толщины газового слоя для устройств различной конфигурации приводится в справочной литературе.

Излучение существенно зависит от температуры - эта зависимость гораздо более сильная по сравнению с законом Ньютона-Рихмана. По закону Стефана-Больцмана плотность потока излучения зависит от абсолютной температуры тела в четвертой степени. Таким образом, увеличение температуры тела резко увеличивает долю переноса теплоты путем теплового излучения в суммарном переносе теплоты при больших температурах. В этих условиях вклад излучения в суммарный перенос теплоты может играть решающую роль.

Суммарное излучение, проходящее через произвольную поверхность в единицу времени, называют потоком излучения Q , [Вт].

Поток излучения, проходящий через единицу поверхности по всем направлениям полусферического пространства, называют плотностью потока излучения E , [Вт/м²].

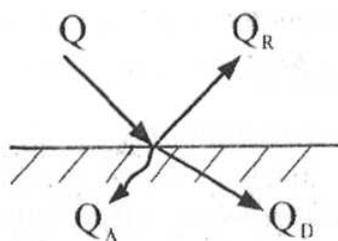


Рис. 1. Поглощение, отражение, пропускание падающего излучения



Рис. 2. Полное поглощение падающего излучения абсолютно черным телом

Допустим, на поверхность твердого тела падает поток излучения Q (рис.1). Часть этого потока поглощается теплом Q_A , часть отражается от поверхности Q_R , и часть проходит сквозь тело Q_D . Так что

$$Q_A + Q_R + Q_D = Q, \quad (1)$$
$$\frac{Q_A}{Q} + \frac{Q_R}{Q} + \frac{Q_D}{Q} = 1,$$
$$A + R + D = 1.$$

Рассмотрим последовательно все слагаемые:

- 1) $\frac{Q_A}{Q} = A$ - поглощательная способность тела. Это часть падающего излучения Q , которая поглощается данным телом. Предельное значение равно единице (когда весь поток поглощается). Такие тела называют абсолютно черными (рис.2).
- 2) $\frac{Q_R}{Q} = R$ - отражательная способность тела.
- 3) $\frac{Q_D}{Q} = D$ - пропускающая способность тела.

Таким образом:

- если $A = 1$, $R = 0$ и $D = 0$, то это тело *абсолютно черное*;
- если $R = 1$, $A = 0$ и $D = 0$, то такие тела называют *зеркальными*;
- если $D = 1$, $A = 0$ и $R = 0$, то такие тела называют *абсолютно прозрачными*.

В природе абсолютно черных, зеркальных и теплопрозрачных тел не существует. Значения A , R и D определяются физическими свойствами данного тела и спектрами падающего излучения.

Закон Планка

Закон Планка устанавливает связь между спектральной плотностью потока абсолютно черного тела, длиной волны λ и температурой тела T . Спектральная плотность потока

$$E_{0\lambda} = \frac{dE}{d\lambda}, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}. \quad (2)$$

Спектральная плотность - это излучение в очень узком интервале длин волн от λ до $\lambda+d\lambda$. Согласно закону Планка

$$E_{0\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)}, \quad (3)$$

где C_1 и C_2 - постоянные Планка; λ - длина волны; T - абсолютная температура. Если $\lambda = 0$, то $E_{0\lambda} = 0$. При увеличении λ увеличивается и $E_{0\lambda}$, достигая своего максимума, затем $E_{0\lambda}$ уменьшается, и при $\lambda = \infty$, $E_{0\lambda} = 0$.

Закон смещения Вина

При увеличении температуры спектральная плотность потока увеличивается, при этом максимальное значение $E_{0\lambda}$ сдвигается в сторону более коротких длин волн (рис. 3), $\lambda_{max} \cdot T = 2,9 \cdot 10^{-3}$, м·К.

Произведение длины волны, при которой имеет место максимальное значение спектральной плотности, на абсолютную температуру есть величина постоянная и равная $2,9 \cdot 10^{-3}$ мК.

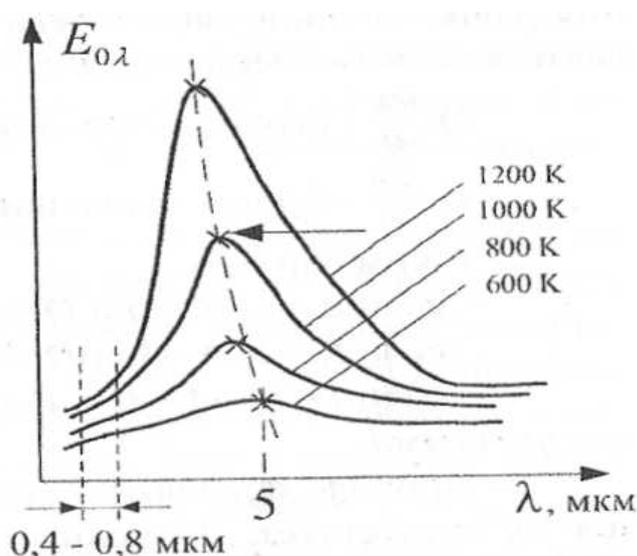


Рис. 3. Зависимость $E_{0\lambda}$ от длины волны при различных температурах

Закон Стефана-Больцмана

Полное количество энергии, излучаемой абсолютно черным телом, по всем длинам волн устанавливается законом Стефана-Больцмана:

$$E_0 = \int_0^{\infty} E_{0\lambda} \cdot d\lambda = C_0 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4, \frac{Вт}{м^2}. \quad (4)$$

Плотность потока излучения абсолютно черного тела пропорциональна абсолютной температуре в четвертой степени, где C_0 - коэффициент излучения абсолютно черного тела,

$C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$. Опытами Стефана и других исследователей было установлено, что закон Стефана-Больцмана выполняется и для реальных тел (серых). Тогда

$$E = C \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4, \quad (5)$$

где C - константа излучения данного тела, $C < C_0$, $C = 0 \div 5,67$.

Сопоставление плотности излучения серого тела с плотностью потока абсолютно черного тела при одной и той же температуре дает важнейшую характеристику лучистого теплообмена, которая называется степенью черноты тела ε :

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0}. \quad (6)$$

Степень черноты тела - справочная характеристика, значение которой приводится в литературе для различных тел с различным состоянием поверхности при различных температурах и определяется, как правило, опытным путем. Знание степени черноты тела позволяет рассчитать плотность потока излучения данного тела через степень черноты и плотность потока излучения абсолютно черного тела:

$$E = \varepsilon \cdot E_0 = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4, \frac{Вт}{м^2}. \quad (7)$$

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

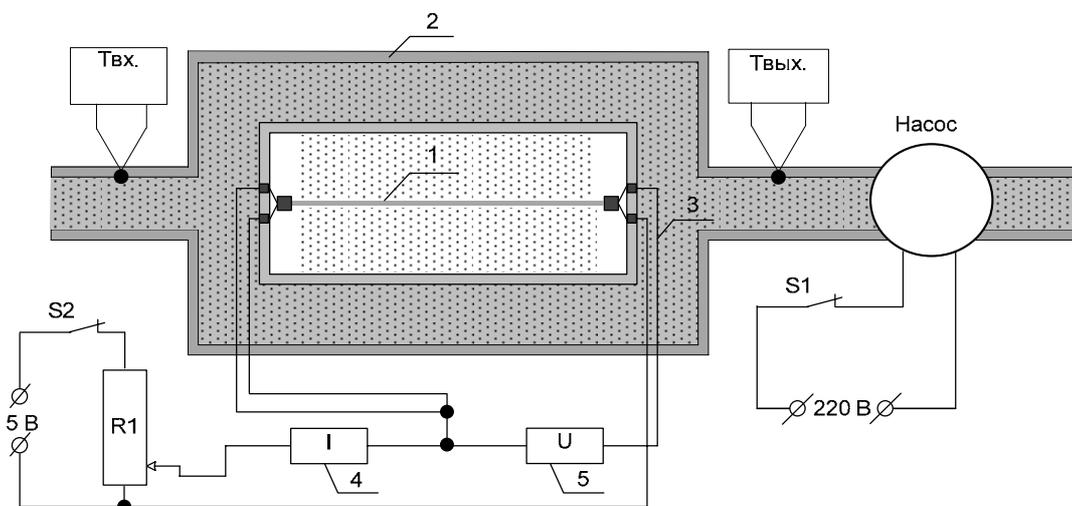


Рис.4. Схема рабочего участка: 1 – проволока; 2 – стеклянный вакуумированный цилиндрический сосуд с водяной охлаждающей рубашкой; 3 – токоподводы, 4 – амперметр, 5 – вольтметр.

Рабочий участок выполнен для случая, когда площади реального цилиндрического тела 1 с оболочкой 2 имеют соотношение $F_1 \ll F_2$.

Рабочий участок представляет собой тонкую проволоку из заданного электропроводящего материала с соответствующей характеристикой излучающей поверхности F_1 , для которой определяется коэффициент излучения C_1 . Он закреплен концами в токоподводах малого электрического сопротивления. Токоподводы впаяны в стеклянный цилиндрический сосуд с двойными стенками, образующими вдоль всего экспериментального участка водяную, проточную тепловоспринимающую рубашку.

Стекло для тепловых лучей очень мало проницаемо. Лучистая энергии от рабочего участка, прошедшая через вакуумированный зазор, превращается в тепловую в основном, в тонкой стеклянной стенке водяной рубашки. Далее тепло путем теплопроводности проходит через стенку и передается конвективно воде. Потеря тепла через площадь поперечного сечения внутренней стеклянной стенки за пределы охлаждающей рубашки рабочего участка в стеклянный корпус калориметра практически ничтожна. Это объясняется тем, что стенка тонкая, площадь торца в сравнении с площадью F_2 стремится к

нулю, продольный градиент температуры мал, как и коэффициент теплопроводности стенки.

При создании установки были поставлены цели:

- исключить теплопроводность и конвективный теплообмен между взаимооблучаемыми поверхностями 1-го и 2-го тел в замкнутом объеме;
- избежать возможного изменения излучающих свойств нагреваемой поверхности за счет ее окисления остатками кислорода в вакуумированном объеме и поверхностном слое испытуемого металла путем неоднократного его заполнения инертным газом (аргоном) и вакуумирования;
- добиться минимальной потери тепла теплопроводностью в токоподводы от электрически нагреваемого рабочего участка путем достижения максимального теплового сопротивления в местах их соединений;
- избежать электрического нагрева токоподводов и места соединения с рабочим участком 1 путем обеспечения надежного электрического контакта и несопоставимо малого электрического сопротивления системы токоподводов по сравнению с рабочим участком;
- добиться постоянства и однозначности температуры t_1 поверхности рабочего участка по всей длине и температуры t_2 внутренней тепловоспринимающей поверхности калориметра путем стабилизации электрического тока, греющего рабочий участок, и расхода воды, охлаждающей калориметр. Чтобы разность $t_1 - t_2$ вдоль рабочего участка была постоянна, необходимо иметь разность температур охлаждающей воды между ее выходом $t_{2вых}$ из экспериментального участка и входом $t_{2вх}$ очень малой, то есть
$$\Delta t_2 = t_{2вых} - t_{2вх} \approx 1 \div 1,5 \text{ } ^\circ\text{C};$$
- добиться, чтобы экспериментальный участок в процессе эксплуатации не менял своей прозрачности. Для этого необходим замкнутый водяной контур с отстойником и фильтром;
- добиться постоянства и однозначности температуры T_f и плотности лучистого потока вдоль рабочего участка. Визуальным наблюдением яркости вдоль рабочего участка принято, что яркость меняется (уменьшается) в непосредственной близости к токоподводам и длина этих участков во много раз меньше длины всей проволоки.

Следовательно, продольный градиент температуры заметен только возле токоподводов.

В конструкции экспериментального участка принято, что расход воды из термостатирующего бака постоянного уровня с фильтром и отстойником автоматически регулируется игольчатым краном и контролируется с помощью ротаметра.

В комплекс измерительных приборов входят: приборы для измерения падения напряжения (U) непосредственно на проволоке рабочего участка и тока нагрева (I).

Для измерения температуры воды $t_{2вх}$ на входе и $t_{2вых}$ на выходе охлаждавшей рубашки рабочего участка, а также для контроля выхода участка на стационарный режим лучистого теплообмена предусмотрен температурный датчик. Показания приборов цифровой индукции дублируются на мониторе.

Из описания установки видно, что схема допускает экспериментальное определение коэффициентов излучения с различных электропроводящих материалов путем замены экспериментальных участков.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

После включения установки в электрическую сеть игольчатым краном открывается подача охлаждающей воды, автоматически обеспечивающая на всех режимах эксперимента одно и то же значение t_2 и $\Delta t_2 \approx 1 \div 1,5^\circ\text{C}$.

Далее вводится и запускается рабочая программа эксперимента и на мониторе высвечивается тема лабораторной работы и представляются возможные варианты проведения экспериментов.

Исследованию на стационарных режимах подлежат идентичные по методике и расчету варианты: а) вольфрамовый рабочий участок при различных температурах излучения; б) медный рабочий участок при различных температурах излучения. Данные по рабочим участкам приведены в табл. 1.

Таблица 1. Свойства рабочих участков

Материал проволоки	$T_{пл}, K$	$d, м$	$L, м$	Площадь	
				Поперечного сечения $S, м^2$	Поверхности излучения $F, м^2$
Вольфрам	3660 ± 60	$0,2 \cdot 10^{-3}$	0,2	$3,14 \cdot 10^{-10}$	$12,56 \cdot 10^{-5}$
Медь	1356 ± 3	$2,0 \cdot 10^{-3}$	0,2	$3,14 \cdot 10^{-6}$	$12,56 \cdot 10^{-4}$

После отображения на экране монитора схемы экспериментальной установки с указанием рабочих процессов и измерительных устройств на пульте установки включается тумблер питания измерительных приборов и можно приступить к исследованию рабочего процесса. Регулятором устанавливается заданный нагрев рабочего участка, а переключателями производится опрос режимных параметров. Регистрация показаний производится по индикаторным приборам, показания которых дублируются на мониторе.

Результаты экспериментов заносятся в протокол испытаний (табл. 2).

По окончании проведения опытов, избранного варианта, производится перевод всех регулирующих приборов в исходное положение. Для другого варианта необходимые действия повторяются вновь в той же последовательности.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Таблица 2. Протокол испытаний и результатов обработки данных

№ режима	$U, В$	$I, А$	$t_{2вх}, °C$	$t_{2вых}, °C$	$R, Ом$	$T_1, К$	$T_2, К$	$Q, Вт$	ε	$\frac{C_1, Вт}{м^2 \cdot К^4}$
1										
2										
3										

1. Определяется разность температур $t_{2вых}$ и $t_{2вх}$ ВОДЫ В охлаждающей рубашке:

$$\Delta t = t_{2вых} - t_{2вх}.$$

2. Определяется электрическая мощность нагрева проволоки рабочего участка:

$$Q = I \cdot U, \text{ Вт},$$

где I – сила тока, протекающего через проволоку, A ; U – падение напряжения на проволоке рабочего участка, V .

3. Определяется омическое сопротивление рабочего участка

$$R = \frac{U}{I}, \text{ Ом}.$$

4. Так как $R = f(T_1)$, то для определения температуры нагретой проволоки T_1 необходимо знать удельное сопротивление ρ_1 , которое определяется по формуле:

$$\rho_1 = \frac{R \cdot S}{L}, \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

где S – площадь поперечного сечения, m^2 ; L – длина рабочего участка проволоки между токоподводами, m .

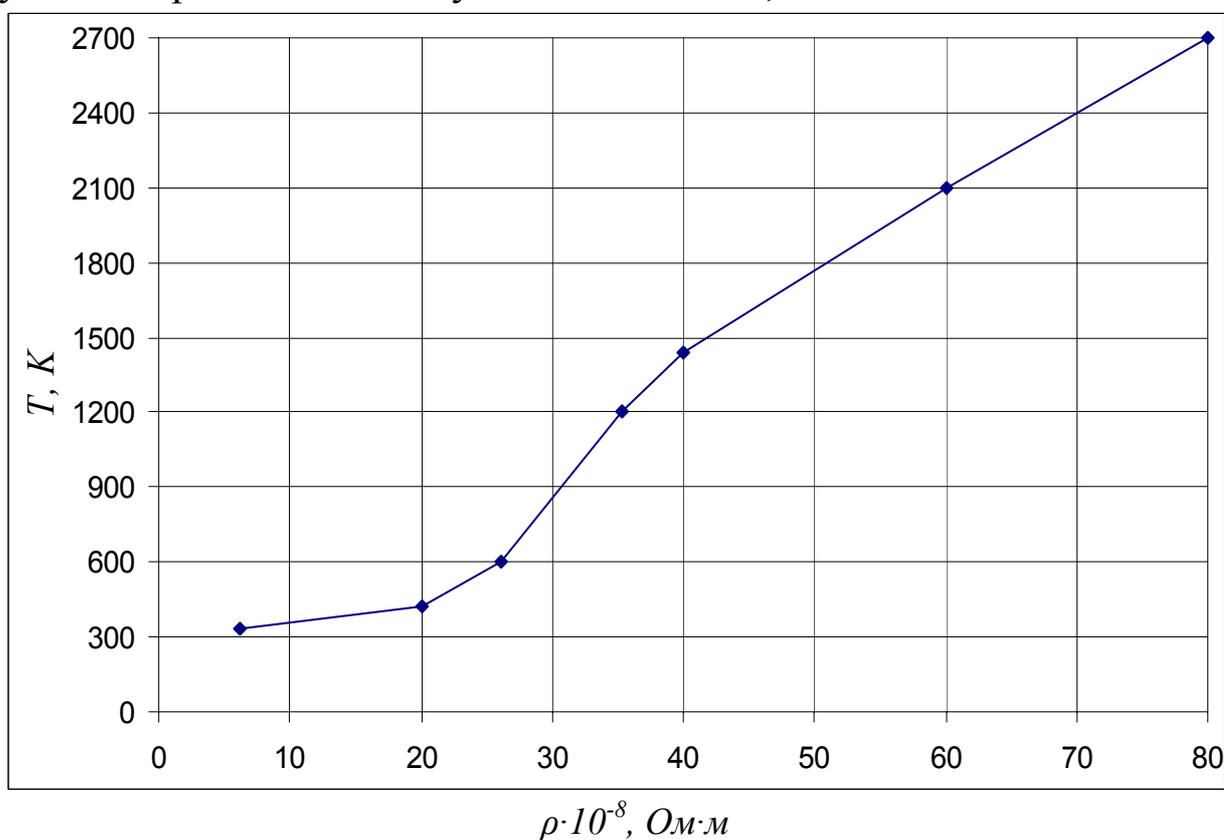


Рис. 5. Изменение удельного сопротивления вольфрама в зависимости от температуры

После расчета ρ_1 температура нагрева поверхности проволоки T_1 определяется по графику $T_1 = f(\rho_1)$ (рис. 5,6), построенному на основании справочных данных.

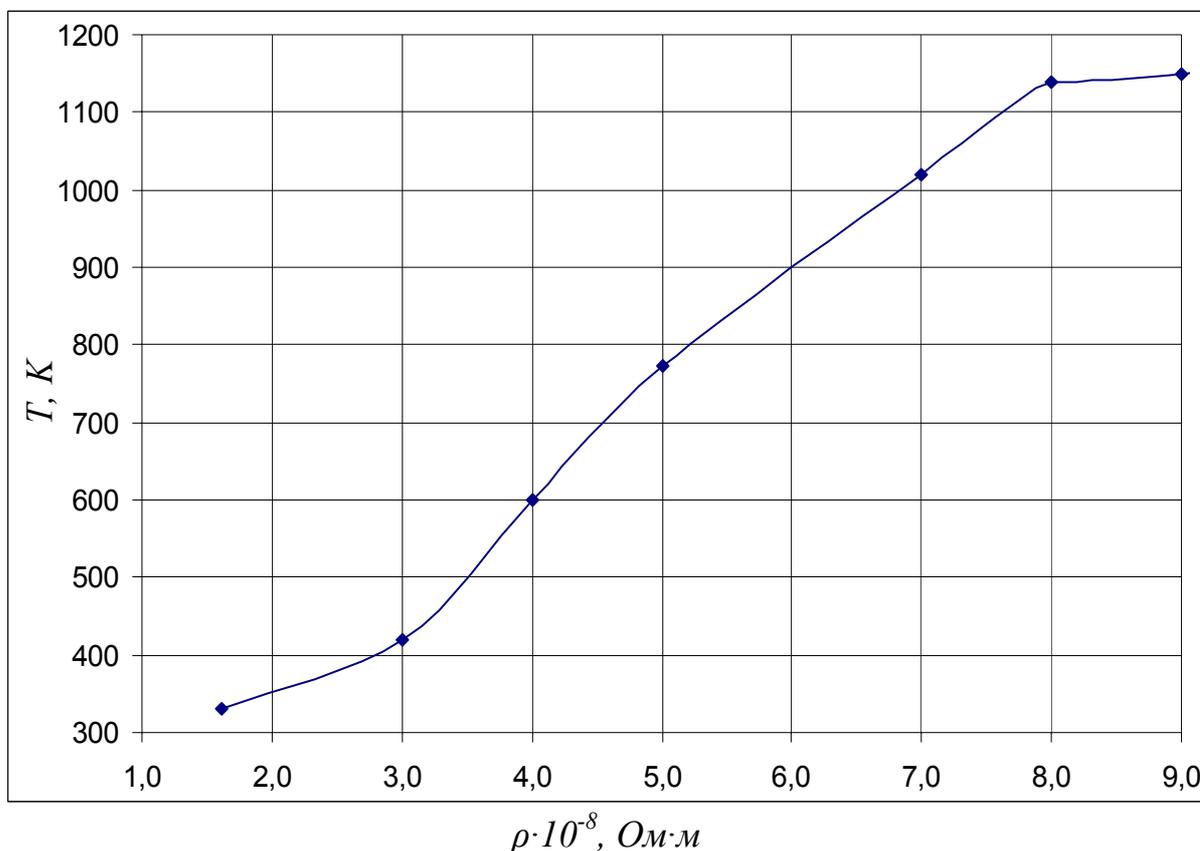


Рис. 6. Изменение удельного сопротивления меди в зависимости от температуры

5. Определяется температура T_2 окружающей проволоку поверхности стеклянной стенки, которая охлаждается водой калориметра. С допустимой точностью можно сказать, что все тепло, выделенное нагретой проволокой при стационарном режиме лучистого теплообмена, отдано через стеклянную стенку охлаждающей воде. Так как термическое сопротивление тонкой стеклянной стенки мало (δ/λ), то можно принять, что температура T_2 стенки поверхности равна средней

температуре охлаждающей воды. Тогда температуру T_2 определяется по формуле:

$$T_2 = \frac{t_{вх} + t_{вых}}{2} + 273, K.$$

6. Определяется коэффициент облучения C_1 и степень черноты ε поверхностей материалов:

$$C_1 = \frac{Q}{F \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}, \frac{Вт}{м^2 \cdot K^4},$$

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0}.$$

7. Результаты обработки опытных данных сводятся в таблицу 2.
8. Строятся графики зависимости коэффициентов излучения и степени черноты поверхности проволоки от температуры $C_1 = f(T_1)$ и $\varepsilon = f(T_1)$.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

Исследование работы теплообменного аппарата при имитационном моделировании процесса теплообмена

Цель работы: с помощью численного эксперимента определить зависимость тепловой мощности теплообменного аппарата в зависимости от схемы включения, вида теплоносителя, геометрических параметров (диаметра наружной и внутренней труб, длины), определить коэффициент теплопередачи в зависимости от режимных параметров, коэффициента теплоотдачи по одному из теплоносителей, а также зависимость тепловой мощности аппарата, коэффициентов теплопередачи и теплоотдачи от геометрических параметров турбулизаторов.

ОСНОВЫ ТЕОРИИ

Теплопередача – процесс переноса теплоты между потоками горячего и холодного теплоносителя через разделяющую эти потоки твердую стенку.

Теплопередача является сложным процессом, который можно разделить на отдельные процессы:

1. процесс теплоотдачи от потока горячего теплоносителя к стенке;
2. процесс теплопроводности через стенку;
3. процесс теплоотдачи от противоположной поверхности стенки к потоку холодного теплоносителя.

В процессе теплопередачи через плоскую стенку вначале теплота передается от горячего теплоносителя t_1 к поверхности стенки t_{cm}' путем конвекции. Количество переданной теплоты определяется по уравнению Ньютона-Рихмана:

$$Q = \alpha_1 \cdot F \cdot (t_1 - t_{cm}'), \quad (1)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$; F – поверхность плоской стенки, $м^2$.

Затем теплота теплопроводностью переносится от одной поверхности стенки t_{cm}' к другой t_{cm}'' . Тепловой поток определяется по уравнению Фурье:

$$Q = \frac{\lambda \cdot F \cdot (t_{cm}' - t_{cm}'')}{\delta}, \quad (2)$$

где $\frac{\delta}{\lambda}$ - термическое сопротивление стенки, $\frac{m^2 \cdot K}{Вт}$.

Потом теплота путем конвекции передается от поверхности стенки t_{cm}'' к холодному теплоносителю t_2 . Количество переданной теплоты определяется по уравнению Ньютона-Рихмана:

$$Q = \alpha_2 \cdot F \cdot (t_{cm}'' - t_2). \quad (3)$$

В результате решения этих трех уравнений переноса теплоты получается следующее выражение:

$$Q = \frac{F \cdot (t_1 - t_2)}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = k \cdot F \cdot (t_1 - t_2). \quad (4)$$

Плотность теплового потока q определяется по формуле:

$$q = \frac{Q}{F} = k \cdot (t_1 - t_2);$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (5)$$

где k – коэффициент теплопередачи, $\frac{Вт}{m^2 \cdot K}$.

Коэффициент теплопередачи – чисто расчетная величина, которая определяется коэффициентами теплоотдачи с обеих сторон стенки и ее термическим сопротивлением. Коэффициент теплопередачи никогда не может быть больше α_1 , α_2 , δ/λ . Сильнее всего он зависит от наименьшего из этих значений, оставаясь всегда меньше его.

Основными уравнениями при расчете теплообменных аппаратов являются уравнения теплового баланса:

$$Q = G_2 \cdot C_{p2} \cdot (T_2' - T_2'') = G_x \cdot C_{px} \cdot (T_x'' - T_x') \quad (6)$$

и теплопередачи:

$$Q = k \cdot F \cdot \overline{\Delta T}. \quad (7)$$

В уравнении (6) индекс z относится к горячему теплоносителю, а индекс x – к холодному; Q – тепловой поток, полученный в теплообменнике при охлаждении горячего теплоносителя, $Вт$;

G_z, G_x – массовые расходы теплоносителей, кг/с; C_{pz}, C_{px} – удельные теплоемкости теплоносителей, Дж/кг·град; $\overline{\Delta T}$ – средний температурный напор.

Уравнение теплового баланса справедливо при условии отсутствия тепловых потерь и фазовых переходов. Обычно несколько процентов (1-10%) теплоты теряется в окружающую среду через стенки теплообменника.

Среднелогарифмические температурные напоры:

$$\text{для прямотока } \overline{\Delta T} = \frac{(T_z' - T_x') - (T_z'' - T_x'')}{\ln \left(\frac{T_z' - T_x'}{T_z'' - T_x''} \right)}, \quad (8)$$

$$\text{для противотока } \overline{\Delta T} = \frac{(T_z' - T_x'') - (T_z'' - T_x')}{\ln \left(\frac{T_z' - T_x''}{T_z'' - T_x'} \right)}. \quad (9)$$

Вместо этих формул можно использовать единую формулу:

$$\overline{\Delta T} = \frac{\Delta T_{\delta} - \Delta T_M}{\ln \left(\frac{\Delta T_{\delta}}{\Delta T_M} \right)}, \quad (10)$$

справедливую как при прямотоке, так и при противотоке. Здесь ΔT_{δ} – больший температурный напор; ΔT_M – меньший температурный напор.

Если температура теплоносителей вдоль поверхности теплообмена изменяется незначительно по сравнению с температурным напором, то температурный напор можно определить как среднеарифметический между ΔT_{δ} и ΔT_M , т.е. $\overline{\Delta T} = 0,5 \cdot (\Delta T_{\delta} + \Delta T_M)$. Данную формулу используют, если $\Delta T_{\delta} / \Delta T_M < 2$.

Классификация теплообменных аппаратов

Теплообменный аппарат - устройство, в котором теплота от потока горячего теплоносителя передается потоку холодного теплоносителя, часто через разделяющую эти потоки стенку.

Теплообменные аппараты разделяют на следующие типы:

1. Рекуперативные теплообменные аппараты, в которых перенос теплоты от одного теплоносителя к другому происходит через разделяющую их стенку. Направление теплового потока в стенке остается неизменным. Такие аппараты, как правило, работают в стационарных условиях.

2. Регенеративные теплообменные аппараты, в которых теплота горячего теплоносителя вначале нагревает поверхность теплообменного аппарата и аккумулирует тепло горячего теплоносителя, затем горячий теплоноситель удаляется и на его место подается холодный теплоноситель, который воспринимает теплоту с уже нагретой поверхности. Направление теплового потока в стенках аппарата периодически меняется. Аппараты этого типа работают в нестационарных условиях. Примером таких аппаратов являются различные воздухоподогреватели, например воздухоподогреватели мартеновских и доменных печей. Аппараты 1 и 2 типов относятся к теплообменным аппаратам, в которых процесс теплопередачи неразрывно связан с поверхностью самого аппарата.

3. Смесительные теплообменные аппараты, в которых процесс теплопередачи между теплоносителями осуществляется за счет непосредственного контакта их и смешения. При смешении теплоносителей наряду с теплообменом имеет место и массообмен. Примером таких аппаратов являются градирни электростанций, в которых нагретая горячая вода, подаваемая на полочки градирни, частично испаряясь, соприкасается с атмосферным воздухом.

4. Теплообменные аппараты с внутренними источниками теплоты. В них, как правило, используется только один теплоноситель, который отводит теплоту, выделяющуюся в самом аппарате. Примером таких аппаратов являются электрические нагреватели излучения и ядерные реакторы.

Широкое применение на практике нашли рекуперативные теплообменные аппараты. Их можно классифицировать следующим образом:

а) По взаимному направлению потоков теплоносителей:

1. Прямоточная схема движения теплоносителей. В этом случае теплоносители в аппарате движутся в одном направлении параллельно друг другу.

2. Противоточная схема, при реализации которой теплоносители в аппарате движутся параллельно, но навстречу друг другу.

3. Перекрестный ток. В этом случае направления движения теплоносителей пересекаются.

4. Одновременно прямоток и противоток.

5. Многократно перекрестный ток.

б) По роду теплоносителей:

Аппараты, в которых оба теплоносителя не меняют своего агрегатного состояния (газо-газовые, жидко-жидкостные, газожидкостные).

Аппараты, в которых изменяется агрегатное состояние одного теплоносителя. Например, конденсаторы (горячего теплоносителя), парогенераторы, испарители (холодного теплоносителя).

Аппараты, в которых изменяются агрегатные состояния обоих теплоносителей (конденсаторы-испарители).

в) По конструктивному оформлению: трубчатые, трубчато-ребристые, пластинчатые, пластинчато-ребристые, трубчато-пластинчатые.

Наиболее распространенной конструкцией являются трубчатые аппараты. Поверхность теплообмена таких аппаратов состоит из одной или нескольких труб. Простейший теплообменник – типа труба в трубе – состоит всего из одной трубы, которая внутри омывается одним теплоносителем, а снаружи – другим, который протекает в кольцевом пространстве между теплообменной трубой и кожухом. Если теплообменник состоит из нескольких труб, то они собираются в трубный пучок с помощью трубных досок. Трубы с трубными досками заключены в кожух.

В зависимости от схемы движения и соотношения теплоемкостей, массовых расходов теплоносителей встречается несколько случаев изменения температуры теплоносителей в теплообменных аппаратах. Анализ этих схем позволяет сделать следующие выводы:

1. Больше изменение температуры имеет место у того теплоносителя, у которого теплоемкость массового расхода имеет

наименьшее значение. Например, на рис. 1.б $\Delta t_1 > \Delta t_2$, так как $W_1 < W_2$.

2. В случае прямоточной схемы конечная температура горячего теплоносителя t_1'' всегда больше конечной температуры холодного теплоносителя t_2'' (рис. 1);

3. В случае противотока конечная температура холодного теплоносителя t_2'' может быть больше конечной температуры горячего теплоносителя t_1'' (рис. 2.б): $t_2'' > t_1''$. Следовательно, при одной и той же начальной температуре в случае противотока холодный теплоноситель можно нагреть до более высокой температуры.

В случае прямоточной схемы температурный напор между теплоносителями изменяется наиболее сильно вдоль поверхности по сравнению с противоточной схемой (рис. 1). Однако при прочих равных условиях средний температурный напор между теплоносителями при противоточной схеме по абсолютной величине оказывается большим по сравнению с прямоточной схемой движения, Это позволяет при одном и том же значении теплового потока уменьшить площадь поверхности теплопередачи:

$$Q = K \downarrow F \cdot (t_1 - t_2) \uparrow.$$

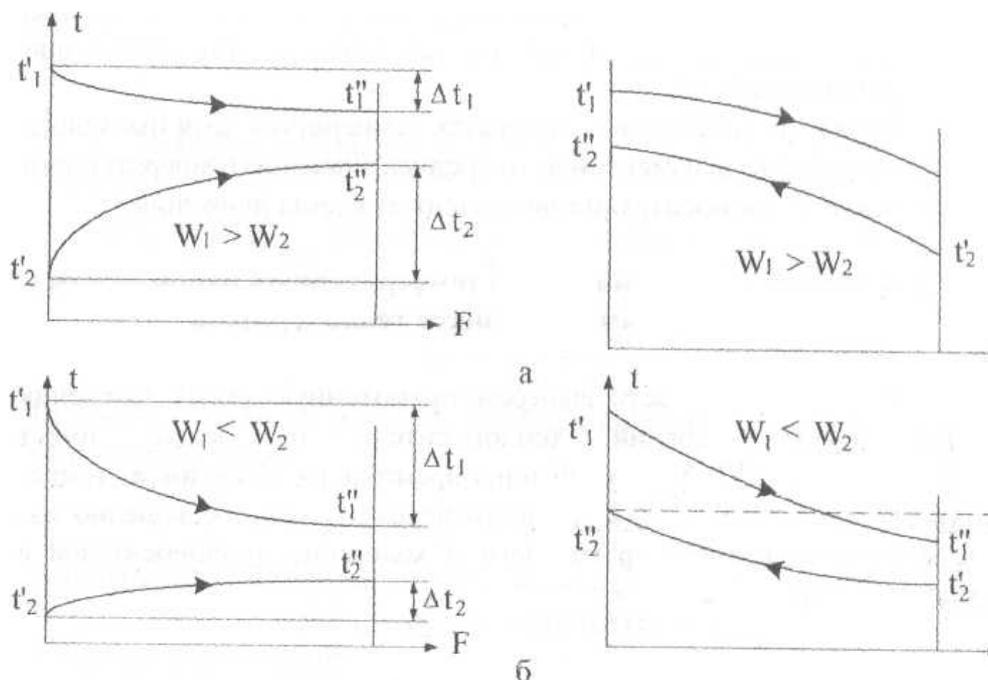


Рис. 1. Прямоток

Рис. 2. Противоток

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка размещена на специальном стенде и состоит из макета теплообменного аппарата, блока управления и контрольно-измерительных приборов, системного блока с клавиатурой и монитора.

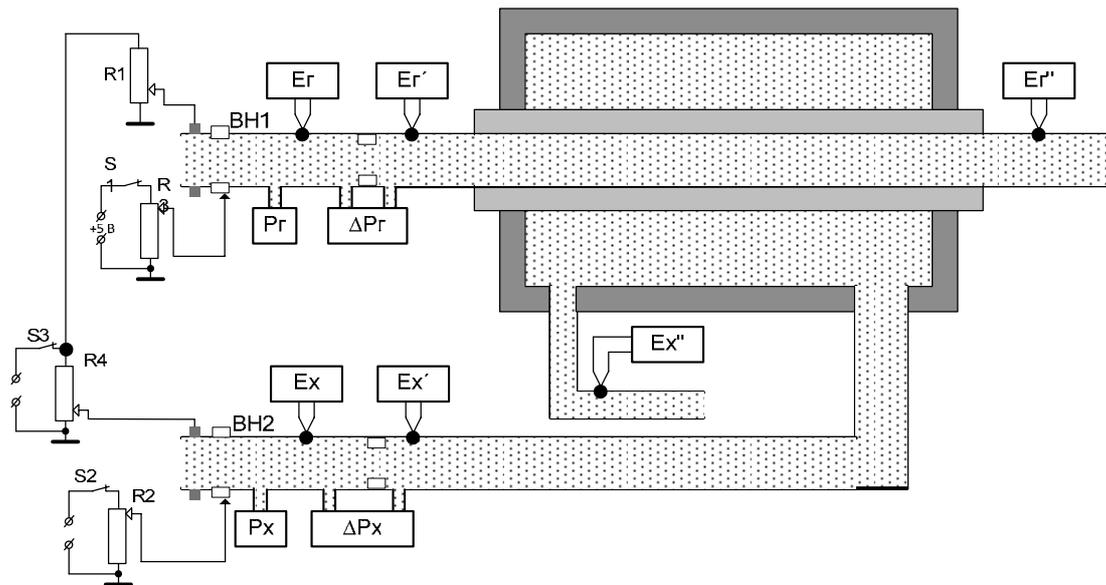


Рис. 3. Схема рабочего участка при противотоке

Блок управления и контрольно-измерительных приборов состоит из трех секций: блока давления 1, блока давления 2 и блока температуры.

Первый блок включает в себя ручки регулирования расхода горячего теплоносителя (путем изменения положения регулирующей задвижки) и температуры горячего теплоносителя на входе в аппарат. Расход контролируется по показаниям дифференциального манометра, установленного на этом же блоке, температура - по милливольтметру, установленному в блоке температур. Второй блок давления включает в себя ручки управления регулирования расхода холодного теплоносителя (путем изменения положения регулирующей задвижки) и температуры холодного теплоносителя на входе в аппарат. Расход контролируется по показаниям дифференциального манометра, установленного на этом же блоке, температура - по милливольтметру. В блоке температуры милливольтметр, помимо температур горячего и холодного теплоносителя перед диафрагмами (ЭДС соответствующих термопар

$EГ$, $EХ$) измеряет температуры горячего теплоносителя на входе и выходе (соответственно $EГ1$, $EГ2$) и холодного ($EХ1$, $EХ2$).

На данной установке применен метод имитационного моделирования. Рабочая программа исследования вводится в память микропроцессора. Одним из основных управляющих органов при проведении исследования является клавиатура с присоединенным к ней монитором, с помощью которой ведется диалог с ЭВМ, выбираются схемы течения в теплообменном аппарате типа "труба в трубе", вводятся основные режимные параметры установки.

Рабочий участок создан по аналогии с реальным. Схема участка отображается на мониторе. Принято, что он состоит из внутренней трубы, по которой течет горячий теплоноситель, и концентрично с ней расположенной наружной трубы. В кольцевом зазоре течет холодный теплоноситель. В качестве теплоносителей по обеим сторонам можно брать воздух или воду.

Расположенный на установке макет теплообменника имеет следующие геометрические размеры: внутренний диаметр теплообменной трубы $d_1 = 0,014$ м, наружный $d_2 = 0,016$ м, внутренний диаметр наружной трубы $d_3 = 0,034$ м, длина $L = 1,01$ м. При исследовании теплообменного аппарата можно менять его геометрические параметры в следующих пределах: $d_1 = 0,006 \div 0,022$ м; $d_2 = 0,008 \div 0,024$ м; $d_3 = 0,01 \div 0,04$ м; $L = 0,3 \div 5,0$ м.

При исследовании теплообменника, в котором на трубе размещены кольцевые турбулизаторы, необходимо также задать диаметр кольцевых диафрагм d_1' ($d11$), диаметр кольцевых канавок d_2' ($d21$), шаг размещения диафрагм и канавок t (T).

Горячий и холодные теплоносители, пройдя регулируемую задвижку и диафрагмы расходомера, попадают в теплообменник. Возможна подача горячего и холодного теплоносителей в одном направлении по схеме прямотока, и в противоположных направлениях по схеме противотока.

Предусматриваются измерения следующих параметров: перепад давлений на диафрагме горячего теплоносителя ΔP_2 ($ДРГ$), перепад давлений на диафрагме холодного теплоносителя ΔP_x ($ДРХ$); давление перед диафрагмой горячего теплоносителя P_2 ($РГ$) (для воздуха); давление перед диафрагмой холодного теплоносителя P_x ($РХ$); ЭДС термопары перед диафрагмой горячего теплоносителя E_2 ($ЕГ$) (для воздуха); ЭДС термопары перед диафрагмой холодного

теплоносителя E_x (EX) (для воздуха); ЭДС термопары на входе горячего теплоносителя в теплообменнике E_2' (EG1); ЭДС термопары на выходе горячего теплоносителя из теплообменника E_2'' (EG2); ЭДС термопары на входе холодного теплоносителя E_x' (EX1); ЭДС термопары на выходе холодного теплоносителя E_x'' (EX2). Давление и перепады давлений измерены в $кгс/м^2$, ЭДС термопар в мВ.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

После включения установки в сеть, введения и запуска рабочей программы на мониторе высвечивается тема лабораторной работы и по заданию преподавателя выбирается один из вариантов предстоящего эксперимента. С помощью клавиатуры вводятся геометрические параметры теплообменника: $D1, D11, D2, D21, D3, T, L$; вид теплоносителя по горячей и холодной сторонам; схема течения. По окончании набора параметров и контроля их ввода на экране монитора высвечивается схема экспериментальной установки с отображением направления течения теплоносителей и расположением измерительных устройств.

После этого на пульте установки (рис. 3) включается тумблер питания измерительных приборов и можно приступить к исследованию рабочего процесса. С помощью регулятора расхода на втором блоке давления устанавливается расход холодного теплоносителя путем изменения давления перед диафрагмой PX , а давление PX и перепад давлений на диафрагме DPX фиксируется по индикаторному прибору последовательным переключением тумблера. С помощью регулятора расхода на первом блоке давления устанавливается расход горячего теплоносителя путем изменения давления перед диафрагмой PG , причем давление PG и перепад давлений на диафрагме DPG с помощью тумблера фиксируются по индикаторному прибору. Плавным вращением ручки регулятора нагревательного устройства устанавливается заданное значение термо-ЭДС термопары, установленной на входе по горячей стороны (EG1). Ручка переключателя термопар, находящаяся на блоке температуры, должна при этом быть в положении EG1. Переключение в положение EX, устанавливаем с помощью ручки регулятора

нагревательного устройства заданное значение термо-ЭДС термопары, установленной на входе по холодной стороне *EX1*.

Регистрация измеренных величин производится по индикаторным приборам, показания которых дублируются на мониторе. Результаты экспериментов заносятся в протокол испытаний (табл. 1-2).

Таблица 1. Протокол испытаний (начало)

№ режима	Схема включения	Горячий теплоноситель	Холодный теплоноситель	Геометрические параметры						
				D1	D11	D2	D21	D3	T	L
				м						
1										
2										
3										

Таблица 2. Протокол испытаний (продолжение)

№ режима	Параметры давления				Параметры температуры					
	ДРГ	ДРХ	РГ	РХ	EG	EX	EG1	EX1	EG2	EX2
	кгс/м ²				мВ					
1										
2										
3										

С помощью регуляторов расхода и нагрева теплообменник переводится на следующий тепловой режим и аналогичным образом снимаются необходимые показания.

По окончании проведения экспериментов на заданных режимах производится перевод всех регуляторов в исходное положение.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Определяется температура перед диафрагмами T_2 и T_x на входе в аппарат T'_2 и T'_x , на выходе и по приближенной зависимости:

$$T = \frac{E}{0,0695} + 273,15, K$$

где E – ЭДС соответствующей термопары, мВ.

2. Определяются расходы горячего и холодного теплоносителей.

При использовании в качестве теплоносителя воды ее расход определяется для горячей и холодной сторон:

$$G_2 = 0,0723 \cdot \sqrt{\Delta P_2}, \text{ кг/с,}$$

$$G_x = 0,0723 \cdot \sqrt{\Delta P_x}, \text{ кг/с,}$$

где перепады давлений ΔP_2 и ΔP_x выражены в кгс/м^2 .

При использовании в качестве теплоносителей воздуха, его расходы соответственно будут:

$$G_2 = 0,472 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{P_2 \cdot \Delta P_2}{R \cdot T_2}},$$

$$G_x = 0,472 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{P_x \cdot \Delta P_x}{R \cdot T_x}},$$

где P_2, P_x – давление воздуха перед диафрагмами, кгс/м^2 ;
 $R = \frac{\mu R}{\mu} = \frac{8314}{28,96} = 287,09 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ – газовая постоянная для воздуха.

3. По формулам (8), (9), (10) определяются среднелогарифмические температурные напоры.

4. Вычисляется тепловой поток, передаваемый в аппарате:

$$Q_x = G_x \cdot \overline{C_{px}} \cdot (T_x'' - T_x');$$

$$Q_2 = G_2 \cdot \overline{C_{p2}} \cdot (T_2' - T_2'');$$

где теплоемкости теплоносителей $\overline{C_{p2}}$ и $\overline{C_{px}}$ определяются по средним температурам $\overline{T_2} = 0,5 \cdot (T_2' + T_2'');$; $\overline{T_x} = 0,5 \cdot (T_x' + T_x'')$ соответственно.

5. Определяется значение коэффициента теплопередачи:

$$K = \frac{Q_x}{\Delta \overline{T} \cdot F_x},$$

если холодный теплоноситель имеет меньший коэффициент теплоотдачи (холодный теплоноситель - воздух), или по формуле:

$$K = \frac{Q_2}{\Delta \overline{T} \cdot F_2}$$

если горячий теплоноситель имеет меньший коэффициент теплоотдачи. Здесь $\overline{F_x} = \pi \cdot d_2 \cdot L$, $\overline{F_2} = \pi \cdot d_1 \cdot L$. Если коэффициенты

теплоотдачи соизмеримы (для теплообменника "вода - вода" или "воздух - воздух" поверхность теплообмена определяется по среднему диаметру).

6. Определяются полные теплоемкости массовых расходов теплоносителей:

$$C_2 = G_2 \cdot \overline{C_{p2}}, \quad C_x = G_x \cdot \overline{C_{px}}.$$

7. Подсчитывается коэффициент тепловой эффективности теплообменного аппарата в каждом из режимов как отношение действительно переданного теплового потока к максимально возможному:

$$\eta = \frac{Q_x}{Q_{xпред}} = \frac{Q}{C_x \cdot (T_2' - T_x')}.$$

8. Определяется число единиц переноса теплоты (безразмерный коэффициент теплопередачи):

$$N = \frac{K \cdot F_x}{C_x}.$$

9. В соответствии с конкретным заданием полученным от преподавателя, определяется изменение величин $\overline{\Delta T}$, K , η , N в зависимости от вида теплоносителя, схемы течения, величин G_2 , G_x , T_2' , T_x' , а также геометрических параметров аппарата d_1 , d_2 , d_3 , L . Следует построить график изменения величин $\overline{\Delta T}$, K , η , N в зависимости от изменяющихся в эксперименте величин и проанализировать полученные результаты.

Соотношение энергетических единиц

$$1 \text{ Дж} = 0,24 \text{ Кал}$$

$$1 \text{ кДж} = 0,28 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$$

$$1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}$$

$$1 \text{ кКал} = 4,2 \text{ Дж}$$

$$1 \text{ кКал/ч} = 1,163 \text{ Вт}$$

Литература

1. Нащокин, В.В. Техническая термодинамика и теплопередача / В.В. Нащокин. - М.: Высшая школа, 1969. – 560 с.
2. Оцисик, М.Н. Сложный теплообмен / М.Н. Оцисик. - М. : Мир, 1976. – 616 с.
3. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: справочник / Е.В. Аметистов, В.А. Григорьев, Б.Т. Емцев. - М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.
4. Исследование процесса теплопередачи в кожухозмеевиковом теплообменном аппарате : метод. указания к лабораторным работам / сост.: А.А. Сагдеев, Н.И. Куприянычева. – Казань : Казан. гос. технол. ун-т, 2001. – 20 с.
5. Техническая термодинамика и теплотехника : метод. указания к лабораторным работам / сост.: А.А. Сагдеев, А.М. Низамов, Н.И. Куприянычева. – Казань : Казан. хим.-технол. ин-т, 2005. – 84 с.
6. Дьяконов, В.Г. Основы теплопередачи: учебное пособие / В.Г. Дьяконов, О.А. Лощанков. – Казань : Казан. нац. исслед. ун-т : КНИТУ, 2011. – 232 с.
7. Куприянычева, Н.И. Тепло-массообмен : учебно-методическое пособие / Н.И. Куприянычева, А.А. Сагдеев, К.А. Сагдеев. – Нижнекамск : Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ», 2011. – 92 с.

Приложение

Таблица 1

Термодинамические свойства некоторых материалов

<i>Наименование материала</i>	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{град}}$	$c, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{град}}$
Асбест листовой	770	30	0,1163	0,816
Асбоцемент	-	20	0,0800	-
Бетон	2300	20	1,2790	1,130
Каменный уголь	1400	20	0,1830	1,310
Кирпич красный	1800	0	0,7680	0,879
Минеральная вата	200	50	0,0465	0,921
Слюда	290	20	0,5820	0,879
Стекло	2500	20	0,7440	0,670
Стекланная вата	200	0	0,0370	0,670
Шлаковая вата	250	100	0,0698	-
Алюминий	2670	0	204	0,921
Латунь	8600	0	85	0,377
Медь	8800	0	384	0,381
Никель	9000	20	58	0,461
Олово	7230	0	64	0,221
Ртуть	13600	0	7,9	0,138
Свинец	11400	0	35	0,130
Серебро	10500	0	458	0,234
Фторопласт-4	2200	20	0,2326	1,005
Чугун	7220	20	63	0,502

Таблица 2

Коэффициенты теплового излучения различных материалов

<i>Наименование материала</i>	ε
Алюминиевый лист	0,09
Алюминий полированный	0,04 – 0,06
Асфальт	0,93
Базальт	0,72
Бетон	0,85
Бронза	0,10
Железо полированное	0,14 – 0,38
Кирпич, огнеупорная глина	0,75
Красный кирпич	0,90
Латунь полированная	0,03
Латунь окисленная при 600 °С	0,60
Никель полированный	0,07
Никель окисленный	0.59 - 0.86
Серебро полированное	0,02 – 0,03
Сталь нержавеющая	0,85
Сталь нержавеющая полированная	0,08
Стекло	0,92
Углерод неокисленный	0,81
Углеродистая нить	0,77
Хлопковая ткань	0,77
Чугун после плавки	0,44
Черная краска эпоксидная	0,89

Таблица 3

Теплофизические свойства сухого воздуха при атмосферном давлении

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	$\lambda \cdot 10^2, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$	$a \cdot 10^5, \text{м}^2/\text{ч}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$
263	1,342	1,009	2,361	6,28	12,43
273	1,293	1,005	2,442	6,77	13,28
283	1,247	1,005	2,512	7,22	14,16
293	1,205	1,005	2,593	7,71	15,06
303	1,165	1,005	2,675	8,23	16,00
313	1,128	1,005	2,756	8,75	16,96
323	1,093	1,005	2,826	9,26	17,95
333	1,060	1,005	2,896	9,79	18,97
343	1,029	1,009	2,966	10,28	20,02
353	1,000	1,009	3,047	10,87	21,09
363	0,972	1,009	3,128	11,48	22,10
373	0,946	1,009	3,210	12,11	23,13
393	0,898	1,009	3,338	13,26	25,45
413	0,854	1,013	3,489	14,52	27,80
433	0,815	1,017	3,640	15,80	30,09
453	0,779	1,021	3,780	17,10	32,49
473	0,746	1,026	3,931	18,49	34,85
523	0,674	1,038	4,268	21,96	40,61
573	0,615	1,047	4,606	25,76	48,33

Таблица 4

Теплофизические свойства воды на линии насыщения

T, K	$P, МПа$	$c_p, \frac{кДж}{кг \cdot град}$	$\lambda \cdot 10^2, \frac{Вт}{м \cdot град}$	$\alpha \cdot 10^5, м^2/ч$	$\nu \cdot 10^6, м^2/с$
283	1,013	4,191	0,575	4,94	1,306
293	1,013	4,183	0,599	5,16	1,006
303	1,013	4,174	0,618	5,35	0,805
313	1,013	4,174	0,634	5,51	0,659
323	1,013	4,174	0,648	5,65	0,556
333	1,013	4,178	0,659	5,78	0,478
343	1,013	4,187	0,668	5,87	0,415
353	1,013	4,195	0,675	5,96	0,365
363	1,013	4,208	0,680	6,03	0,326
373	1,013	4,220	0,683	6,08	0,295
383	1,43	4,233	0,685	6,13	0,272
393	1,98	4,250	0,686	6,16	0,252
403	2,70	4,266	0,686	6,19	0,233
413	3,61	4,287	0,685	6,21	0,217
423	4,76	4,312	0,684	6,22	0,203
433	6,18	4,346	0,683	6,23	0,191
443	7,92	4,379	0,679	6,22	0,181
453	10,03	4,417	0,675	6,20	0,173
463	12,55	4,459	0,670	6,17	0,165
473	15,55	4,505	0,663	6,14	0,158
493	23,20	4,614	0,645	5,99	0,148
513	33,48	4,756	0,628	5,84	0,141

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Лабораторная работа № 1.....	5
Лабораторная работа № 2.....	14
Лабораторная работа № 3.....	21
Лабораторная работа № 4.....	33
Литература.....	45
Приложение.....	46

Учебное издание

Сагдеев Камиль Айратович
старший преподаватель

Гумеров Фарид Мухамедович
доктор технических наук, профессор

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Корректор Габдурахимова Т.М.
Худ. редактор Федорова Л.Г.

Сдано в набор 14.12.2012.
Подписано в печать 22.01.2013.
Бумага писчая. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 3,2. Тираж 100.
Заказ №1.

НХТИ (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ»,
г. Нижнекамск, 423570, ул. 30 лет Победы, д. 5а.

