

Министерство образования Республики Беларусь
**БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ПОЛИТЕХНИЧЕСКАЯ
АКАДЕМИЯ**

Кафедра «Теплогазоснабжение и вентиляция»

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

по тепломассообмену для студентов
специальности Т.19.05 - «Теплогазоснабжение, вентиляция
и охрана воздушного бассейна»

Минск 1998

**Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ПОЛИТЕХНИЧЕСКАЯ
АКАДЕМИЯ**

Кафедра «Теплогазоснабжение и вентиляция»

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

**по тепломассообмену для студентов
специальности Т.19.05 - «Теплогазоснабжение, вентиляция
и охрана воздушного бассейна»**

Минск 1998

УДК 621.1.016.7

Лабораторный практикум предназначен для студентов специальности Т.19.05 - «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна» и служит для выполнения лабораторных работ по курсу «Тепломассообмен». Тематика лабораторных работ охватывает важнейшие разделы курса и соответствует программе по тепломассообмену.

Составители:

В.Д.Акельев, И.И.Станецкая, Е.С.Калиниченко

Рецензент А.П.Несенчук

©, Акельев В.Д., Станецкая И.И.,
Калиниченко Е.С., составление,
1998

Общие указания

1. Для выполнения лабораторных работ следует ознакомиться с основными правилами их проведения, получить инструктаж по технике безопасности и противопожарной технике.

2. Подготовка к лабораторной работе заключается в ознакомлении с методикой ее выполнения по настоящему практикуму, с учебной литературой по курсу, а также в оформлении протокола работы.

3. Отчет по работе должен включать: цель работы, основные расчетные зависимости, схему установки, результаты наблюдений и их обработки, выводы.

Отчет оформляется в соответствии с СТП 10-02.01.87.

Основные правила техники безопасности

1. Запрещается включать и выключать лабораторные установки без разрешения преподавателя; переставлять приборы, аппараты и другое оборудование; прикасаться к токоведущим частям, которые находятся или могут находиться под нагрузкой; производить переключения электрических проводов на лабораторных установках; касаться нагретых поверхностей.

2. При обнаружении неисправностей или повреждении лабораторного оборудования необходимо немедленно сообщить об этом преподавателю.

3. В случае пожара следует немедленно принять меры по ликвидации загорания, при необходимости вызвать пожарную команду по телефону 01.

4. При несчастном случае необходимо оказать первую помощь пострадавшему. В случае необходимости вызвать скорую помощь по телефону 03.

Лабораторная работа № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ РЕГУЛЯРНОГО РЕЖИМА

Цель работы:

Ознакомление с закономерностями регулярного режима; определение коэффициентов температуропроводности различных материалов методом акалориметра; расчет коэффициентов теплопроводности.

1.1. Общие сведения

Характеристикой тела с точки зрения выравнивания температуры является величина, называемая коэффициентом температуропроводности a . Коэффициент температуропроводности численно равен количеству теплоты, протекающей в единицу времени через единицу поверхности при перепаде концентрации внутренней энергии в 1 Дж/м^3 на единицу длины нормали. Он является коэффициентом диффузии внутренней энергии или энтальпии в зависимости от условий сопряжения тела с окружающей средой ($V=\text{const}$ или $p=\text{const}$). Коэффициент температуропроводности имеет кинематическую размерность, в которую не входят измерители массы и энергии, и характеризует скорость перераспределения температуры, выражаемую в $\text{м}^2/\text{с}$ или $\text{м}^2/\text{ч}$.

С коэффициентом теплопроводности λ , плотностью ρ и массовой удельной теплоемкостью c коэффициент температуропроводности связан выражением

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (1.1)$$

Величина, обратная коэффициенту температуропроводности, характеризует инерционные свойства тела в отношении распространения температурного поля. Одним из наиболее теплоинерционных тел является вода. Коэффициент температуропроводности зависит от физических свойств тела, его температуры.

В настоящей работе коэффициент температуропроводности определяется методом, основанным на закономерностях регулярного

теплового режима, который является разновидностью нестационарного теплового режима.

Если тело поместить в жидкость с большей или меньшей температурой, начнется процесс теплообмена, который продолжается до тех пор, пока температура тела во всех его точках не станет равной температуре жидкости. В начальный момент времени этот процесс будет неупорядоченным из-за влияния температурного поля, которое существовало до начала теплообмена. По истечении некоторого времени ($F_0 > 0,55$) изменение температурного поля описывается уравнением

$$v = t_{ж} - t = A \cdot V \cdot \exp(-m \cdot \tau), \quad (1.2)$$

где v - избыточная температура, °C;

t - температура тела, °C;

$t_{ж}$ - температура жидкости, °C;

A - коэффициент, зависящий от формы тела;

V - функция, зависящая от координат точки;

τ - время, с;

m - темп охлаждения (нагрева), 1/с.

Процесс теплопроводности, при котором поле избыточной температуры v автомодельно во времени, то есть остается подобным при изменении времени, называется регулярным тепловым режимом. Такой режим продолжается до выравнивания температур тела и жидкости.

Таким образом, весь процесс теплообмена включает:

1) явно неупорядоченный процесс, характеризующийся большим влиянием температурного поля при $\tau=0$,

2) регулярный режим, когда температурное поле изменяется по экспоненте и скорость теплообмена для всех точек не зависит от времени;

3) равновесный режим, когда температура тела во всех точках постоянна и одинакова, то есть на границе тела нет теплообмена.

Логарифмируя (1.2) при постоянной температуре окружающей среды, получаем

$$\ln v = -m \tau. \quad (1.3)$$

Из (1.3) следует, что натуральный логарифм избыточной температуры в любой точке изменяется во времени по линейному закону

После дифференцирования уравнения (1.3) по времени получаем

$$m = -\frac{\partial v}{v \cdot \partial \tau} = \text{const} \quad (1.4)$$

Темп охлаждения m характеризует относительную скорость изменения избыточной температуры в теле и зависит от его физических свойств, процесса теплообмена на его поверхности, геометрической формы и размеров тела.

Для определения темпа охлаждения измеряют температуру тела в процессе его теплообмена с жидкостью, имеющей постоянную температуру. Затем в полулогарифмических координатах находят зависимость $\ln v$ от времени (рис. 1.1).

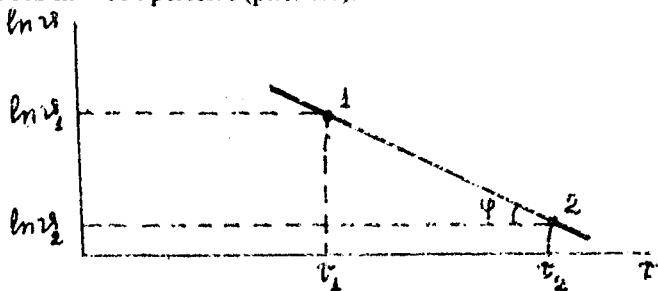


Рис. 1.1. Зависимость $\ln v$ от времени τ

Темп охлаждения определяется как тангенс угла наклона отрезка прямой 1-2 к оси абсцисс

$$m = \operatorname{tg} \varphi = \frac{\ln v_1 - \ln v_2}{\tau_2 - \tau_1} \quad (1.5)$$

Если теплообмен происходит при коэффициенте теплоотдачи, стремящемся к ∞ (практически достаточно, если $Bi > 100$), то граничные условия 3-го рода переходят в граничные условия 1-го рода. Тогда коэффициент температуропроводности будет находиться из выражения

$$\alpha l = A m, \quad (1.6)$$

где A - коэффициент пропорциональности (коэффициент формы), зависящий только от геометрических размеров и формы тела; для

неограниченной пластины, шара, параллелепипеда и цилиндра A находится соответственно из формул (1.7)...(1.10):

$$A = \frac{I}{\left(\frac{\pi}{2\delta}\right)^2}; \quad (1.7)$$

$$A = \frac{I}{\left(\frac{\pi}{r}\right)^2}; \quad (1.8)$$

$$A = \frac{I}{\left(\frac{\pi}{\ell_1}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{\ell_2}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{\ell_3}\right)^2}; \quad (1.9)$$

$$A = \frac{I}{\left(\frac{2,405}{r}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{\ell}\right)^2}, \quad (1.10)$$

где δ, r, ℓ - соответственно толщина, радиус, длина образца, м.

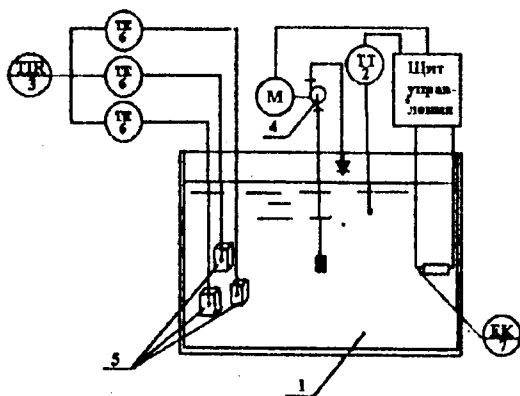


Рис. 1.2. Схема лабораторной установки

1.2. Описание лабораторной установки

Установка состоит из термостата 1, исследуемых образцов 5, потенциометра 3, термопар 6 и термометра 2 для измерения температуры воды в термостате (рис. 1.2). Для интенсивного перемешивания воды имеется двигатель 4 с крыльчаткой. Постоянство температуры в термостате достигается с помощью электротермометра, контактная схема которого настроена на требуемую температуру. Нагрев воды осуществляется электронагревателем 7.

1.3. Методика выполнения работы

В термостат с водой, имеющей постоянную температуру, помещаем один или несколько образцов из различных материалов и включаем секундомер. Затем измеряем температуру образцов через каждую минуту до наступления теплового равновесия между образцами и водой. Результаты измерений сводим в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Результаты измерений

№ пп	Время τ , мин	Температура среды $t_{ж}$, °C	Температура образцов					Примечание
			t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	

1.4. Обработка результатов эксперимента

Находим графическую зависимость $\ln v = f(\tau)$. Рекомендуемый масштаб: 1 мин - 1 см; 0,05 $\ln v$ - 1 см. Линейная зависимость между $\ln v$ и τ свидетельствует о наступлении регулярного режима. На прямой выбираем две точки с интервалом времени не менее 5 мин и по формуле (1.5) определяем темп охлаждения.

Используя данные измерений, по формулам (1.7-1.10) рассчитываем коэффициент формы.

Теплофизические характеристики и геометрические размеры образцов приведены в табл. 1.2.

Из формулы (1.1) определяем коэффициент теплопроводности материала образца и сравниваем со справочными данными. Результаты расчета сводим в табл. 1.3.

Таблица 1.2

Теплофизические характеристики и геометрические размеры образцов

Номер образца	Материал	С, кДж/(кг·К)	ρ, кг/м ³	Размеры цилиндра, м	
				г	l
1	Песок	0,84	1600	0,030	0,091
2	Газосиликат	0,84	800	0,030	0,088
3	Бетон	0,88	2400	0,031	0,108
4	Кирпич	0,88	1600	0,031	0,108
5	Цементно-песчаный раствор	0,84	1800	0,031	0,1

Таблица 1.3

Результаты расчета

№ пп	Избыточная температура		Темп. охлаждения т, 1/с	Кэф. фи- цент формы А, м ²	Кэффицент температуро- проводности а, м ² /с	Кэффицент теплопроводности λ, Вт/(м·К)	Кэффицент теплопроводности по справочным материалам λ, Вт/(м·К)
	v, °С	lnv					

По результатам расчета делаем анализ полученных данных и формулируем выводы.

1.5. Контрольные вопросы

1. Физический смысл коэффициентов температуро- и теплопроводности.
2. Методы определения коэффициента теплопроводности.
3. Что называется регулярным тепловым режимом?

4. При каких граничных условиях определяется коэффициент температуропроводности?

5. Как влияет термическое контактное сопротивление на точность определения коэффициента температуропроводности?

Лабораторная работа № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПОЛУОГРАНИЧЕННОГО ТЕЛА ПРИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ВТОРОГО РОДА

Цель работы:

Экспериментальное определение температурного поля полуограниченного тела при граничных условиях второго рода; расчет количества теплоты, полученного сыпучим материалом.

2.1. Общие сведения

Температурное поле - это совокупность мгновенных значений температуры в данный момент времени во всех точках пространства. В общем случае уравнение температурного поля имеет вид

$$T = f(x, y, z, \tau), \quad (2.1)$$

где x, y, z - координаты точки;

τ - время.

Температурное поле, изменяющееся во времени, называется нестационарным, не изменяющееся во времени - стационарным.

Нестационарное температурное поле имеет место при реализации большинства тепловых и технологических процессов, например, при нагреве и охлаждении строительных конструкций, термообработке полуфабрикатов, формировании химических или физических превращений, связанных с изменением температур, и т.п.

Найти неизвестную функцию (2.1) можно путем интегрирования дифференциального уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (2.2)$$

дополнив его условиями однозначности - совокупностью всех частных особенностей данного процесса.

К условиям однозначности относятся:

- 1) геометрические условия, согласно которым задаются форма и линейные размеры тела;
- 2) теплофизические характеристики тела;
- 3) начальные условия, характеризующие распределение температуры в начальный момент времени;
- 4) граничные условия (ГУ), характеризующие тепловое взаимодействие поверхности тела с окружающей средой;
- 5) интенсивность и местоположение внутренних источников теплоты.

Геометрическая форма тела обычно характеризуется в виде неограниченного и полуограниченного тела, неограниченной пластины, бесконечного цилиндра, шара и т.д.

Полуограниченное тело с одной стороны ограничено плоскостью уз, а с другой стороны простирается в бесконечность. Температурное поле такого тела описывается уравнением

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (2.3)$$

Теплофизические характеристики - это коэффициенты теплопроводности λ , температуропроводности a , плотность ρ и др.

Начальные условия состоят в задании закона распределения температуры тела в начальный момент времени. В общем случае начальные условия могут быть записаны следующим образом:

$$T_0 = f(x, y, z, 0). \quad (2.4)$$

Граничные условия могут быть четырех видов.

1. ГУ I рода состоят в задании распределения температуры на поверхности тела в любой момент времени

$$T_c = f(x, y, z, \tau). \quad (2.5)$$

2. ГУ II рода состоят в задании плотности теплового потока для каждой точки поверхности тела в любой момент времени

$$q = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (2.6)$$

3. ГУ III рода характеризуют закон конвективного теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой при постоянном потоке теплоты

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_n = -\frac{\alpha}{\lambda} (T_c - T_{ж}), \quad (2.7)$$

где n - нормаль к поверхности тела;

α - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

λ - коэффициент теплопроводности тела, Вт/(м·К).

4. ГУ IV рода характеризуют условия теплообмена системы тел по закону распределения теплопроводности (предполагается, что между телами осуществляется идеальный контакт)

$$\lambda_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial n_1} \right)_n = \lambda_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial n_2} \right)_n. \quad (2.8)$$

Для ряда задач дифференциальное уравнение теплопроводности (2.1) при заданных условиях однозначности решается аналитически.

В настоящей работе необходимо определить температурное поле в полуограниченном теле при граничных условиях II рода в начальной стадии развития нестационарного режима.

Условия однозначности могут быть представлены в виде следующих уравнений:

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}; \tau > 0; \quad (2.9)$$

$$\infty > x > 0; \quad (2.10)$$

$$T(x, 0) = T_0 = \text{const}; \quad (2.11)$$

$$\lambda \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = q_c = \text{const}; \quad (2.12)$$

$$T(\infty, \tau) = T_0; \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial T(\infty, \tau)}{\partial x} = 0. \quad (2.14)$$

При решении этой задачи было получено выражение

$$T(x, \tau) - T_0 = \frac{2q_c}{\lambda} \cdot \sqrt{a\tau} \cdot \text{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}}. \quad (2.15)$$

Значение функции $\text{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}}$ для 1-го члена ряда приведены в табл. III приложения.

2.2. Описание лабораторной установки

Установка состоит из теплоизолированного сосуда в форме параллелепипеда, заполненного песком и разделенного на две равные части 1 и 2 плоским малоинерционным электрическим нагревателем 3 (рис. 2.1), который через амперметр 4, вольтметр 5 и трансформатор 6 подключен к электросети.

По оси параллелепипеда с шагом 15 мм установлены десять термопар 7, которые через переключатель соединены с потенциометром 8.

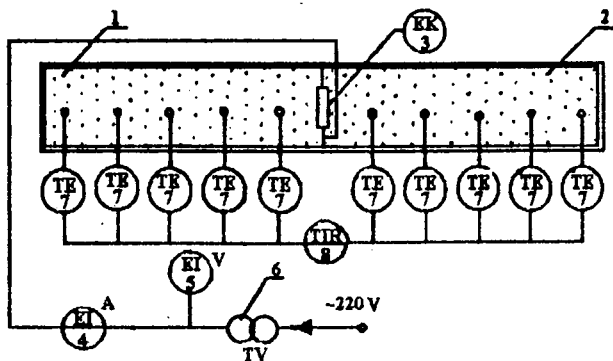


Рис. 2.1. Схема лабораторной установки

2.3. Методика выполнения работы

Включаем нагреватель и потенциометр в электрическую сеть. Переключая последовательно термодатчики, снимаем показания потенциометра. Опыт повторяем не менее пяти раз через 3-4 минуты. Затем нагреватель и потенциометр отключаем от сети. Результаты измерений заносим в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Результаты измерений

№ пп	Время τ , мин	Температура на расстоянии x , мм, от нагревателя										Сила тока I , А	Напряжение U , В	
		75	60	45	30	15	-15	-30	-45	-60	-75			

2.4. Обработка результатов эксперимента

По результатам эксперимента находим графическую зависимость избыточной температуры $\nu = t - t_0$ от времени, а также рассчитываем температурное поле по (2.15) для различных x и τ .

Зная температурное поле в отдельные интервалы времени, рассчитываем количество теплоты, полученное сыпучим материалом от плоского нагревателя, по формуле

$$\Sigma Q = A \left[\Delta\tau_1 (v_1^{\Delta\tau_1} + v_2^{\Delta\tau_1} + \dots + v_5^{\Delta\tau_1}) + \dots + \Delta\tau_5 (v_1^{\Delta\tau_5} + v_2^{\Delta\tau_5} + \dots + v_5^{\Delta\tau_5}) \right], \quad (2.16)$$

где $A = C_p \cdot \rho \cdot V = C_p \cdot m = C_p \cdot \rho \cdot \ell_1 \cdot \ell_2 \cdot \Delta x$,

где C_p - массовая изобарная теплоемкость песка, кДж/(кг·К);

ρ - плотность песка, кг/м³;

V - объем песка между термopарами, м³;

m - масса песка между термopарами, кг;

ℓ_1, ℓ_2 - геометрические размеры песка между термopарами;

Δx - расстояние между термopарами, м;

$\Delta\tau_1 \dots \Delta\tau_5$ - интервалы времени между измерениями температур;

$v_1^{\Delta\tau_1} + \dots + v_5^{\Delta\tau_5}$ - изменение температур в различных сечениях установки в различные интервалы времени.

Количество теплоты, генерируемое нагревателем, можно также рассчитать по уравнению

$$\Sigma Q = [(\mathfrak{Z}_1 \cdot U_1)^{\Delta\tau_1} \cdot \Delta\tau_1 + (\mathfrak{Z}_2 \cdot U_2)^{\Delta\tau_2} \cdot \Delta\tau_2 + \dots + (\mathfrak{Z}_5 \cdot U_5)^{\Delta\tau_5} \cdot \Delta\tau_5] / 2, \quad (2.17)$$

где $(\mathfrak{Z}_n \cdot U_n)^{\Delta\tau_n}$ - мощность нагревателя в промежутке времени $\Delta\tau_n$.

Результаты расчета сводим в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Результаты расчета

№ пп	Время τ , мин	Температура на расстоянии x , мм, от нагревателя t° , С										ΣQ , Вт
		75	60	45	30	15	-15	-30	-45	-60	-75	

По результатам расчета формулируем выводы.

2.5. Контрольные вопросы

1. Что называется температурным полем?
2. Дифференциальное уравнение теплопроводности.
3. Что входит в условия однозначности?
4. В чем состоят начальные условия?
5. Граничные условия I, II, III и IV родов.

Лабораторная работа № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ ОДИНОЧНОЙ ТРУБЫ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В НЕОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Цель работы:

Определение коэффициента теплоотдачи поверхности горизонтальной и вертикальной трубы в условиях естественной конвекции.

3.1. Общие сведения

Процесс переноса теплоты в пространстве с неоднородным полем температуры называют теплообменом. Существуют три вида теплообмена: теплопроводность, конвективный теплообмен и теплообмен излучением.

Теплопроводность - это перенос теплоты посредством хаотического (теплого) движения микрочастиц. Молекулы, атомы, электроны и другие микрочастицы вещества движутся со скоростями, пропорциональными их температуре. Быстродвижущиеся частицы отдают свою энергию при взаимодействии более медленно, переноса таким образом теплоту из более нагретых в менее нагретые зоны.

В жидкости (термином "жидкость" обозначается любая сплошная среда, обладающая свойствами текучести) перенос теплоты может осуществляться за счет перемешивания ее объемов, причем перемешивание может быть вызвано как естественным путем, так и искусственным. Если движение жидкости возникает в результате разности плотностей нагретых и холодных ее слоев, то такой процесс называют свободной или естественной конвекцией, а если под

действием внешних сил (насоса, вентилятора и т.п.), - вынужденной конвекцией.

Совместный перенос теплоты конвекцией и теплопроводностью - это конвективный теплообмен, конвективная теплоотдача.

Тепловой поток от поверхности тела к жидкости равен

$$Q_0 = \alpha_0 (t_c - t_{ж}) \cdot F, \quad (3.1)$$

где α_0 - коэффициент теплоотдачи (теплообмена) от поверхности тела к жидкости, Вт/(м²·К);

$t_c, t_{ж}$ - температуры поверхности тела и жидкости соответственно, °С;

F - поверхность теплообмена, м².

Количество теплоты, воспринимаемое или отдаваемое поверхностью тела, равно

$$Q_0 = Q_k + Q_{л}; \quad (3.2)$$

$$Q_k = \alpha_k (t_c - t_{ж}) \cdot F; \quad (3.3)$$

$$Q_{л} = \alpha_{л} (t_c - t_{ж}) \cdot F, \quad (3.4)$$

где $\alpha_k, \alpha_{л}$ - коэффициенты конвективной теплоотдачи и теплоотдачи излучением соответственно, Вт/(м²·К).

Коэффициент теплоотдачи излучением определяется выражением

$$\alpha_{л} = \varphi_{1,2} \frac{\varepsilon_{пр} C_0 \left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ж}}{100} \right)^4 \right]}{T_c - T_{ж}}, \quad (3.5)$$

где $\varphi_{1,2}$ - угловой коэффициент излучения (учитывает часть теплового излучения первого тела, которая воспринимается вторым телом);

$\varepsilon_{пр}$ - приведенная степень черноты системы тел;

C_0 - коэффициент излучения абсолютно черного тела,

$$C_0 = 5,67 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K}^4);$$

T_c - температура поверхности тела, К;

$T_{ж}$ - температура поверхностей окружающих тел, принимаемая равной температуре окружающей среды, К.

С учетом (3.3) и (3.4) уравнение (3.2) примет вид

$$Q_o = (\alpha_k + \alpha_l) \cdot (t_c - t_{ж}) \cdot F. \quad (3.6)$$

Коэффициент конвективной теплоотдачи α_k численно равен количеству теплоты, отдаваемому (воспринимаемому) единицей поверхности теплообмена за единицу времени при разности температуры в один градус между поверхностью тела и жидкостью.

Коэффициент теплоотдачи зависит от геометрических факторов, связанных с конфигурацией системы конвективного теплообмена (течение жидкости вдоль плоской поверхности, поток в трубе, поперечное обтекание трубы и т.п.); гидродинамических факторов, обусловленных режимом течения жидкости и ее скоростью; теплофизических свойств жидкости (плотность, вязкость, теплопроводность); температурного перепада между поверхностью твердого тела и жидкостью.

Определение α_k возможно следующим образом.

На основании результатов эксперимента рассчитывается общий коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_o = \frac{Q_o}{(t_c - t_{ж}) \cdot F} \quad (3.7)$$

и коэффициент теплоотдачи излучением α_l по формуле (3.5), а затем коэффициент конвективной теплоотдачи

$$\alpha_k = \alpha_o - \alpha_l. \quad (3.8)$$

Аналитическое определение α_k представляет сложную задачу, связанную с решением системы дифференциальных уравнений, поэтому обычно используют критериальные уравнения подобия, которые можно рассчитать, используя экспериментальные данные.

Критерии (числа) подобия - это безразмерные комплексы физических величин, отражающие совместное влияние совокупности физических величин на явление. Критерии подобия, состоящие из физических величин, заданных условиями однозначности, называ-

ют определяющими, а содержащие неизвестные величины – неопределяемыми.

Обобщение экспериментальных данных проводится в виде зависимости между числами подобия например,

$$Nu_m = c(Gr \cdot Pr)_m^n, \quad (3.9)$$

где $Nu_m = \frac{\alpha \cdot \ell}{\lambda_m}$ - число Нуссельта, характеризует соотношение между конвективным потоком теплоты от жидкости к поверхности тела ($\alpha \cdot \Delta t$) и потоком теплоты теплопроводностью в жидкости у поверхности тела $\left(\frac{\lambda_m}{\ell} \Delta t\right)$;

$$Gr_m = \frac{q \ell^3 \Delta t \beta_m}{\nu_m^2} - \text{число Грасгофа, характеризует соотношение}$$

между подъемной силой в жидкости, возникающей вследствие разности плотностей, и силой вязкости;

$$Pr_m = \frac{\nu_m}{a_m} - \text{число Прандтля, характеризует соотношение между}$$

силами инерции и вязкости;

c, n - коэффициенты, зависящие от режима движения жидкости у поверхности тела; принимаются по табл.3.1 в зависимости от значения числа Релея $Ra_m = (Gr \cdot Pr)_m$;

ℓ - определяющий размер тела; принимается характерный линейный размер тела в направлении теплового потока, м;

λ_m - коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·К);

q - ускорение силы тяжести, м/с²;

Δt - температурный перепад между поверхностью тела и жидкостью, $\Delta t = t_{\text{ж}} - t_{\infty}$, °С;

β_m - коэффициент объемного расширения, для идеальных газов

$$\beta = T_{\infty}^{-1} = (273 + t_{\infty})^{-1}, K^{-1};$$

ν_m - коэффициент кинематической вязкости жидкости, м²/с;

a_m - коэффициент температуропроводности жидкости, м²/с.

Значения коэффициентов c и n

Число Релея	c	n
$1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^2$	1,18	1/8
$5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4
$2 \cdot 10^7 - 1 \cdot 10^{13}$	0,135	1/3

Физические характеристики жидкости находят из табл. П2, П3, П4, П5 прил. по определяющей температуре

$$t_m = \frac{t_{ж} + t_c}{2} \quad (3.10)$$

3.2. Описание лабораторной установки

Установка выполнена в виде стальной трубы с наружным диаметром 22 мм и длиной 550 мм, внутри которой расположен электрический нагреватель 1 (рис. 3.1). Для измерения напряжения используется вольтметр 2, тока - амперметр 3. В стенке трубы запаяны четыре термопары (спай хромель-копелевые) 4, подключенные к потенциометру 5.

С помощью шарнира труба может быть расположена горизонтально или вертикально.

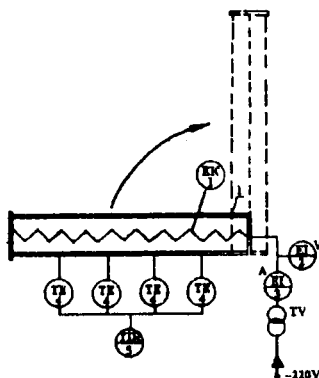


Рис. 3.1. Схема экспериментальной установки

3.3. Методика выполнения работы

Устанавливаем трубу в горизонтальном положении. Включаем в электрическую цепь потенциометр и нагреватель. Измеряем температуру окружающего воздуха, силу тока и падение напряжения в цепи. Температуру поверхности трубы измеряем с интервалом 3...5 мин до наступления стационарного режима.

При включении нагревателя в электрическую сеть в нем выделяется теплота, расходуемая на нагрев трубы и теплопотери. Через какое-то время вся теплота в нагревателе расходуется на покрытие тепловых потерь в окружающую среду. Температура поверхности трубы изменяется с течением времени. Когда она становится постоянной, значит, установился стационарный тепловой режим.

Опыт повторяем для вертикального расположения трубы при тех же режимах. Результаты измерений записываем в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Результаты измерений

№ пп	Сила тока I, А	Падение напряжения U, В	Температура				
			окружающего воздуха $t_{ж}$, °С	поверхности трубы t_c , °С			
				№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Горизонтальное положение трубы							
1							
2							
...							
n							
Вертикальное положение трубы							
1							
2							
...							
n							

3.4. Обработка результатов эксперимента

Поскольку при стационарном режиме вся теплота, выделяемая нагревателем, расходуется на теплопотери в окружающую среду, т.е.

$$N = I \cdot U = Q_o, \quad (3.11)$$

то общий коэффициент теплоотдачи можно определить из выражения

$$\alpha_o = \frac{N}{(t_c - t_{ж}) \cdot F} \quad (3.12)$$

Коэффициент теплоотдачи излучением находим из (3.5), принимая угловой коэффициент излучения равным 1,0 (излучение от поверхности трубы полностью воспринимается окружающими телами), а приведенную степень черноты системы равной степени черноты трубы, так как площадь поверхности трубы значительно меньше площади поверхностей окружающих тел. Принимаем $\epsilon_{пр}$ для поверхности трубы равной 0,8.

Затем из (3.8) находим коэффициент конвективной теплоотдачи. Результаты расчетов заносим в табл. 3.3.

Коэффициент α_x определяем также по критериальному уравнению подобия (3.9) и сравниваем со значением α_x из табл. 3.3.

Определяющим размером горизонтальной трубы является ее наружный диаметр, вертикальной - длина.

Таблица 3.3

Результаты расчета

Мощность нагревателя $N, \text{ Вт}$	Поверхность теплоотдачи $F, \text{ м}^2$	Коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$		
		α_o	α_l	α_x
Горизонтальное положение трубы				
.....				
Вертикальное положение трубы				
.....				

Значения λ_m , ν_m , Pr_m выбираются из табл. П.2 прил. по температуре t_m (3.10).

Результаты расчета по (3.9) заносим в табл. 3.4.

Т а б л и ц а 3.4

Результаты расчета α_k

Значение чисел подобия			Коэффициент теплоотдачи α_k , Вт/(м ² ·К)
Gr_m	Ra_m	Nu_m	
Горизонтальное положение трубы			
.....			
Вертикальное положение трубы			
.....			

После завершения расчета необходимо сделать анализ полученных результатов и объяснить неодинаковость значений коэффициента конвективной теплоотдачи α_k для горизонтального и вертикального положений трубы.

По данной работе может быть выполнена студенческая учебно-исследовательская работа, которая состоит в использовании теории подобия. Для этого необходимо провести эксперимент при разных температурах поверхности трубы (разных мощностях нагревателя).

Обобщение экспериментальных данных проводится в виде зависимости между числами подобия по уравнению (3.9).

Задача заключается в определении показателя степени n и постоянного коэффициента c . Для этого по результатам опытов рассчитывают числа Nu и Ra . Представленные в таком виде данные изображают в логарифмической системе координат, приняв по осям один и тот же масштаб.

График, определяющий функциональную зависимость в логарифмических координатах, является прямой линией, наиболее приближающейся к опытным точкам. Тангенс угла наклона этой линии равен показателю степени n . Постоянный коэффициент c определяют по данным любой точки линии

$$c = Nu/Ra^n.$$

После завершения расчета необходимо сделать анализ полученных результатов.

3.5. Контрольные вопросы

1. Какие существуют способы переноса теплоты?
2. Что представляют собой свободная и вынужденная конвекция, конвективный теплообмен?
3. От каких факторов зависит интенсивность теплоотдачи при естественной конвекции?
4. Какие температуры и геометрические размеры тела принимаются за определяющие при расчете коэффициента теплоотдачи?
5. Что представляют собой критерии подобия, критериальные уравнения?
6. Физическая сущность чисел Нуссельта, Грасгофа, Прандтля.

Лабораторная работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИНЫ МЕТОДОМ СРАВНЕНИЯ

Цель работы:

Усвоение основных сведений о лучистом теплообмене и радиационных свойствах поверхностей твердых тел; определение степени черноты пластины при различных температурах.

4.1. Общие сведения

Все тела непрерывно излучают и поглощают внутреннюю энергию, которая переносится электромагнитными волнами со скоростью около 300000 км/с. Энергия излучения охватывает широкий диапазон длин волн (от радиоволн длиной в несколько мк до космического излучения с длиной волны до 10^{12} м).

В интервале длин волн 0,4...0,8 мк излучение воспринимается сетчаткой нашего глаза как свет той или иной окраски; от 0,8 до 80 мк находится область инфракрасных, или тепловых лучей.

Излучателями тепловых волн являются заряженные материальные частицы, т.е. электроны и ионы, излучающие энергию порциями - квантами. Энергия квантов $(0,1...2,5) \cdot 10^{-19}$ Дж определяется формулой

$$L = h \cdot \nu, \quad (4.1)$$

где h - постоянная Планка, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с;

ν - частота волны, Гц.

Переход квантов из одного энергетического состояния в другое сопровождается поглощением или излучением внутренней энергии тела. С повышением температуры количество переходов с верхних уровней на нижние увеличивается, поэтому излучение усиливается.

Интегральный лучистый поток, излучаемый единицей поверхности по всем направлениям за единицу времени, называется плотностью излучения тела (E , Вт/м²), или лучеиспускательной способностью.

E зависит от температуры тела, его кристаллической решетки, состояния поверхности.

Абсолютно черное тело - это тело, которое полностью поглощает все падающее на него излучение независимо от направления этого излучения, его спектрального состава и поляризации, ничего не отражая и не пропуская через себя.

Поверхность, отражающую полностью все падающие на нее лучи, называют абсолютно белой.

Тела, полностью пропускающие сквозь себя лучи, называются абсолютно проницаемыми (диатермичные, прозрачные).

По закону Стефана-Больцмана плотность интегрального излучения абсолютно черного тела равна

$$E_o = \sigma_o \cdot T^4, \quad (4.2)$$

где σ_o - постоянная излучения абсолютно черного тела,

$$\sigma_o = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4).$$

Для инженерных расчетов (4.2) удобнее представить в виде

$$E_o = C_o \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (4.3)$$

где C_o - коэффициент излучения абсолютно черного тела,

$$C_o = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4).$$

Серыми считаются те реальные тела, спектр излучения которых непрерывен и подобен спектру излучения абсолютно черных тел. Для серых тел

$$E = \varepsilon \cdot C_o \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (4.4)$$

где ε - степень черноты.

Степень черноты показывает отношение потока собственного излучения тела E к потоку излучения абсолютно черного тела E_o при той же температуре

$$\varepsilon = \frac{E}{E_o} = \frac{C \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4}{C_o \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4} = \frac{C}{C_o}. \quad (4.5)$$

В общем случае ε для различных тел изменяется от 0 до 1 и зависит от природы материала, его температуры, состояния поверхности, длины волны, направления излучения.

Приведенная степень черноты системы тел, из которых одно находится в полости другого, равна

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_m} + \frac{F_m}{F_B} \left(\frac{1}{\varepsilon_B} - 1 \right)}, \quad (4.6)$$

где ε_m и F_m - степень черноты и площадь поверхности меньшего тела;

ε_B и F_B - степень черноты и площадь поверхности большего тела.

Если $F_m \ll F_B$, то $\frac{F_m}{F_B} \rightarrow 0$ и $\varepsilon_{пр} \cong \varepsilon_m$.

Определение степени черноты тела методом сравнения заключается в следующем.

Если две пластины с одинаковыми температурами и размерами (степень черноты одной пластины известна) разместить одинаково в пространстве, то их конвективные тепловые потоки будут равны между собой

$$Q_{к_1} = Q_{к_2} \quad (4.7)$$

Потоки теплоты, излучаемые пластинами, равны

$$Q_{л_1} = \varepsilon_{np_1} \cdot C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{жс}}{100} \right)^4 \right] \cdot F_1; \quad (4.8)$$

$$Q_{л_2} = \varepsilon_{np_2} \cdot C_0 \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{жс}}{100} \right)^4 \right] \cdot F_2, \quad (4.9)$$

где T_1, T_2 - температуры поверхностей 1-ой и 2-ой пластин, К.

Если площадь поверхностей тел, окружающих пластины, значительно больше площади поверхностей пластин, то

$$\varepsilon_{np_1} = \varepsilon_1; \quad (4.10)$$

$$\varepsilon_{np_2} = \varepsilon_2. \quad (4.11)$$

Так как $F_1 = F_2$ и $T_1 = T_2$, то (4.8) и (4.9) можно записать в виде

$$Q_{л_1} = \varepsilon_1 \cdot C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{жс}}{100} \right)^4 \right] \cdot F_1; \quad (4.12)$$

$$Q_{л_2} = \varepsilon_2 \cdot C_0 \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{жс}}{100} \right)^4 \right] \cdot F_2, \quad (4.13)$$

где $T_{жс}$ - температура поверхностей окружающих пластины тел, принимаемая равной температуре окружающей среды, К.

Вычитая (4.13) из (4.12), получим

$$Q_{\lambda_1} - Q_{\lambda_2} = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot F. \quad (4.14)$$

Вместе с тем, при наличии электрических нагревателей в пластинах общие потоки теплоты от пластин в условиях стационарности будут равны

$$Q_1 = Q_{\kappa_1} + Q_{\lambda_1} = I_1 \cdot U_1; \quad (4.15)$$

$$Q_2 = Q_{\kappa_2} + Q_{\lambda_2} = I_2 \cdot U_2, \quad (4.16)$$

где I_1 и I_2 - сила тока в нагревателях пластин, А;

U_1 и U_2 - падение напряжения в нагревателях, В.

Вычитая (4.16) из (4.15) и учитывая (4.7) и (4.14), получим расчетную формулу для определения степени черноты поверхности 2-ой пластины.

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 - \frac{I_1 \cdot U_1 - I_2 \cdot U_2}{C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\infty}}{100} \right)^4 \right]}. \quad (4.17)$$

4.2. Описание лабораторной установки

Установка состоит из двух пластин 1 и 2 с размерами 150x150 мм (рис. 4.1). Каждая пластина выполнена из двух металлических листов, между которыми находятся плоские электрические нагреватели. На поверхность пластины 1 нанесен слой сажи, а поверхность пластины 2 отполирована. Температура поверхностей пластин измеряется с помощью термопар (№1...6) 7 в комплекте с потенциометром 3. Мощности электрических нагревателей регулируются лабораторными автотрансформаторами 4 и определяются с помощью вольтметров 5 и амперметров 6.

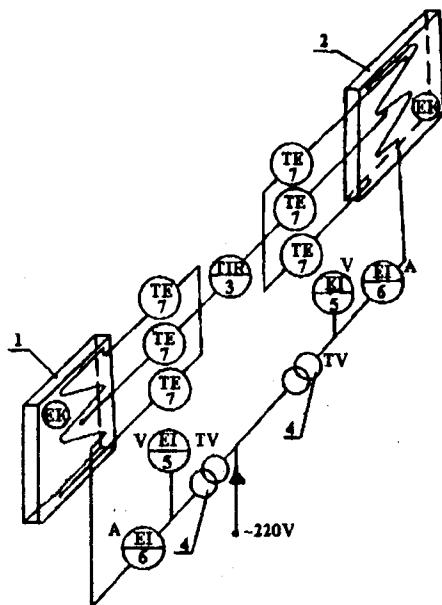


Рис. 4.1. Схема лабораторной установки

4.3. Методика выполнения работы

Устанавливаем по указанию преподавателя ЛАТРоМ требуемые мощности нагревателей. Включаем в электрическую сеть потенциометр. С интервалом 5 мин измеряем температуры поверхностей пластин 1 и 2 до достижения стационарного режима. Записываем показания вольтметров и амперметров. Измеряем температуру окружающей среды. Регулируя мощности нагревателей с помощью ЛАТРоВ, добиваемся равенства температур поверхностей пластин и их постоянства во времени. Результаты измерений заносим в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Результаты измерений

Температура окружающе- го воздуха $t_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$	Пластина 1					Пластина 2						
	сила тока I_1, A	падение напря- жения U_1, B	температура поверхности $t_1, ^\circ\text{C}$			сила тока I_2, A	падение напря- жения U_2, B	температура поверхности $t_2, ^\circ\text{C}$				
			№1	№2	№3			№4	№5	№6		

4.4. Обработка результатов эксперимента

Степень черноты поверхности пластины 1 равна 0,95. Степень черноты поверхности пластины 2 рассчитываем по выражению (4.17).

Сравниваем полученные значения ϵ_2 с данными табл. ПЗ прил. Анализируем результаты опыта и формулируем выводы.

4.5. Контрольные вопросы

1. Физическая природа излучения.
2. В чем отличие лучеиспускания газов и твердых тел?
3. Законы Планка, Кирхгофа, Стефана-Больцмана.
4. Какие тела называют абсолютно черными, абсолютно белыми, диатермичными?
5. Как увеличить или уменьшить степень черноты поверхности твердых тел?
6. В чем заключается сущность метода сравнения?

Лабораторная работа № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ
ВОДОВОДЯНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

Цель работы:

Усвоение основных сведений о рекуперативных теплообменниках, сущности их теплотехнического расчета; определение коэффициента теплопередачи водоводяного теплообменника при разных схемах движения теплоносителей.

5.1. Общие сведения

Теплообменными аппаратами (теплообменниками) называют устройства, предназначенные для передачи теплоты от одной среды к другой при осуществлении различных тепловых процессов - нагрева, охлаждения, кипения, конденсации и др. Жидкие среды, воспринимающие или отдающие теплоту, называют соответственно первичными (горячими) или вторичными (холодными) теплоносителями.

В зависимости от способа передачи теплоты от одного теплоносителя к другому теплообменники подразделяются на смешительные, рекуперативные, регенеративные и с промежуточным теплоносителем. В рекуперативных теплообменниках теплота от первичного теплоносителя к вторичному передается через разделяющую их стенку, например, цилиндрическую.

Теплопередача через стенку трубы включает теплоотдачу от первичного теплоносителя к внутренней поверхности трубы, кондуктивный теплоперенос через стенку и теплоотдачу от внешней поверхности стенки вторичному теплоносителю.

Уравнение теплопередачи для элемента площади поверхности теплообмена dF имеет вид

$$dQ = k \cdot (t_1 - t_2) \cdot dF, \quad (5.1)$$

где k - коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К);

t_1 и t_2 - температуры первичного и вторичного теплоносителей соответственно, °С.

Числовое значение k выражает количество теплоты, проходящей через единицу поверхности стенки в единицу времени при разности температур между первичным и вторичным теплоносителями в один градус.

При соотношении диаметров цилиндрической стенки $d_1/d_2 > 0,5$ k можно рассчитывать по уравнению для плоской стенки

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (5.2)$$

где d_1 и d_2 - внутренний и наружный диаметры трубы соответственно, м;

δ - толщина стенки трубы, м;

λ - коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/(м·К);

α_1 - коэффициент теплоотдачи от первичного теплоносителя к внутренней поверхности трубы, Вт/(м²·К);

α_2 - коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности трубы к вторичному теплоносителю, Вт/(м²·К).

При малой толщине стенки трубы величиной δ/λ можно пренебречь. Тогда (5.2) примет вид

$$k = \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}. \quad (5.3)$$

Таким образом, определение коэффициента теплопередачи сводится к определению α_1 и α_2 .

При вынужденном течении жидкости в трубе характер режима течения определяется числом Рейнольдса

$$Re_{ж} = \frac{w \cdot d}{\nu_{ж}}. \quad (5.4)$$

Если $Re_{ж} < 2300$, режим течения жидкости ламинарный. Тогда

$$Nu_{ж} = 0,15 \cdot Re_{ж}^{0,33} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \cdot Cr_{ж}^{0,1} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25} \cdot \epsilon_{\ell}; \quad (5.5)$$

если $Re_{ж} > 10^4$, режим течения жидкости турбулентный, и расчет проводится по уравнению

$$Nu_{ж} = 0,021 \cdot Re_{ж}^{0,8} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25} \cdot \epsilon_{\ell}, \quad (5.6)$$

где $Nu_{ж} = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda_{ж}}$ - число Нуссельта;

$Pr_{ж} = \left(\frac{\nu}{\alpha} \right)_{ж}$ - число Прандтля;

$Gr_{ж} = \beta_{ж} \frac{g \cdot d^3 \cdot \Delta t}{\nu_{ж}^2}$ - число Грасгофа;

$\left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25}$ - поправка на неизотермичность;

$\lambda_{ж}$ - коэффициент теплопроводности жидкости при средней температуре $t_{ж} = \frac{t' + t''}{2}$, Вт/(м·К);

$\nu_{ж}$ - коэффициент кинематической вязкости жидкости при $t_{ж}$, м²/с;

$\alpha_{ж}$ - коэффициент температуропроводности жидкости при $t_{ж}$, м²/с;

$\beta_{ж}$ - термический коэффициент объемного расширения жидкости при $t_{ж}$, 1/К;

ϵ_l - поправка на отношение l/d , при $l/d \geq 50$ $\epsilon_l = 1$;

l - длина трубы, м;

g - ускорение силы тяжести, $g = 9,81$ м/с²;

Δt - температурный перепад между теплоносителем и стенкой трубы, °С;

t' и t'' - температура жидкости на входе и выходе из теплообменника соответственно, °С.

Значения $\lambda_{ж}$, $\nu_{ж}$, $\beta_{ж}$, $Pr_{ж}$ выбираются из табл. П4 прил. в зависимости от $t_{ж}$; значения Pr_c из той же таблицы - по t_c .

За определяющий размер при течении первичного теплоносителя внутри трубы принимается ее внутренний диаметр d , при течении вторичного теплоносителя в межтрубном пространстве - эквивалентный диаметр $d_{экв}$

$$d_{экв} = \frac{4 \cdot f}{P}, \quad (5.7)$$

где f - площадь поперечного сечения межтрубного пространства, м^2 ;

P - периметр сечения, м.

Разности температур между теплоносителями и стенкой трубы определяются из выражений

$$\Delta t_1 = \frac{t_1' + t_1''}{2} - t_c; \quad (5.8)$$

$$\Delta t_2 = t_c - \frac{t_2' + t_2''}{2}, \quad (5.9)$$

где t_1' и t_1'' - температура первичного теплоносителя на входе и выходе из трубы, $^{\circ}\text{C}$;

t_2' и t_2'' - температура вторичного теплоносителя на входе и выходе из межтрубного пространства, $^{\circ}\text{C}$;

t_c - температура стенки внутренней трубы, $^{\circ}\text{C}$;

$$t_c = \frac{\frac{t_1' + t_1''}{2} + \frac{t_2' + t_2''}{2}}{2}. \quad (5.10)$$

Характер изменения температуры теплоносителей вдоль поверхности теплообменника в случае прямоточного и противоточного движения теплоносителей в зависимости от соотношения их водяных эквивалентов W_1/W_2 представлен на рис. 5.1. Меньше изменяется температура того теплоносителя, у которого больше водяной эквивалент (полная теплоемкость массового расхода теплоносителя в единицу времени, Вт/К).

k можно определить из уравнения (5.1) после его интегрирования

$$k = \frac{Q}{\Delta t_{cp} \cdot F}. \quad (5.11)$$

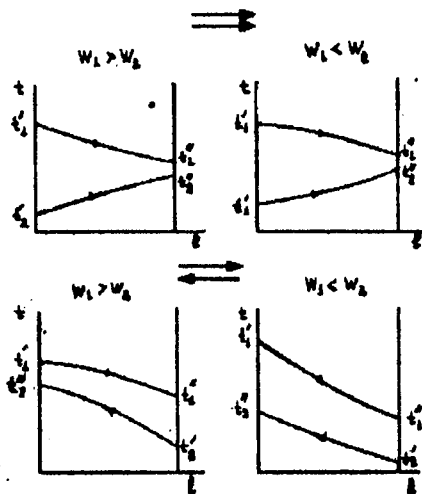


Рис. 5.1. Изменение температуры теплоносителей при прямотоке и противотоке

Если $\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\mu}} \leq 2$, то средний температурный напор рассчитывается по формуле

$$t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} + \Delta t_{\mu}}{2}. \quad (5.12)$$

При $\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\mu}} > 2$ средний температурный напор называется средне-логарифмическим и рассчитывается по формуле

$$t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} + \Delta t_{\mu}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\mu}}}, \quad (5.13)$$

где Δt_{δ} и Δt_{μ} - большая и меньшая разность температур на входе и выходе из теплообменника (рис. 5.1);

для прямотока $\Delta t_{\delta} = t_1' - t_2''$, $\Delta t_{\mu} = t_1'' - t_2'$;

для противотока $\Delta t_{\delta} = t_1' - t_2''$, $\Delta t_{\mu} = t_1'' - t_2'$.

Q в (5.11) при стационарном режиме равно количеству теплоты Q_1 , отданному первичным теплоносителем, и количеству теплоты Q_2 , полученному вторичным теплоносителем, т.е.

$$Q = Q_1 = Q_2.$$

В свою очередь, Q_1 и Q_2 можно определить из уравнений

$$Q_1 = C_{P_1} M_1 \cdot (t_1' - t_1''); \quad (5.14)$$

$$Q_2 = C_{P_2} M_2 \cdot (t_2'' - t_2'), \quad (5.15)$$

где C_{P_1} и C_{P_2} - массовые изобарные теплоемкости первичного и вторичного теплоносителей соответственно, кДж/(кг·К) (табл. П 4 прил. при $t_{ж}$);

M_1 и M_2 - массовые расходы первичного и вторичного теплоносителей соответственно, кг/с.

5.2. Описание лабораторной установки

Основным элементом установки являются соосно расположенные трубы 1 и 2 (рис. 5.2). Диаметры внутренней трубы $d_1/d_2 = 6/8$ мм; наружной трубы $D_1/D_2 = 14/16$ мм; длина 1200 мм. Первичный теплоноситель подается в трубу 2, вторичный - в межтрубное пространство 3. Из теплообменника первичный теплоноситель по трубе 14 возвращается в термостат 4, вторичный - в канализацию 5.

На входе первичного и вторичного теплоносителей установлены вентили 6 и 7, а для измерения расхода - ротаметры 13 и 12.

Температура первичного теплоносителя на входе и выходе из теплообменника измеряется термометрами 8 и 9, вторичного - термометрами 10 и 11.

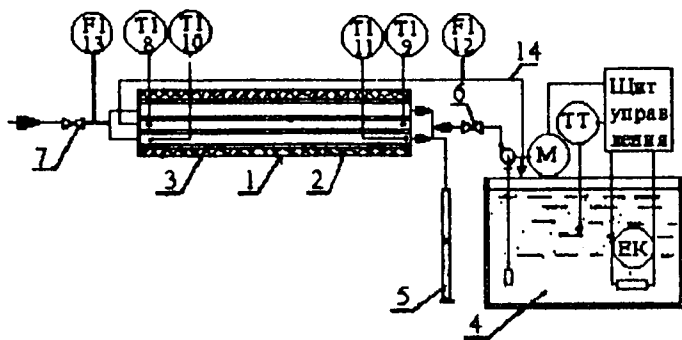


Рис. 5.2. Схема лабораторной установки

5.3. Методика выполнения работы

Открыв вентиль на водопроводе, подаем в теплообменник холодную воду; включаем термостат 4. Через каждые 5 минут измеряем температуру теплоносителей на входе и выходе из теплообменника до наступления стационарного теплового режима, т.е. когда изменение температур за две минуты не превышает 1°C . По показаниям термометров определяем схему движения теплоносителей.

При установившемся тепловом режиме, продолжая измерения температур, через 2-3 минуты измеряем расход вторичного теплоносителя ротаметром 12 в течение 8-10 мин.

Опыты выполняем для прямотока и противотока. Результаты измерений вносим в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Результаты измерений

Схема включения теплообменника	Продолжительность опыта τ , мин	Расход теплоносителя V , л		Температура теплоносителя t , $^{\circ}\text{C}$			
		первичного V_1	вторичного V_2	первичного		вторичного	
				вход t_1'	выход t_1''	вход t_2'	выход t_2''

5.4. Обработка результатов эксперимента

Коэффициент теплопередачи определяем по уравнениям (5.3) и (5.11) в следующей последовательности.

Определяем массовые секундные расходы теплоносителей по формуле

$$M = \frac{V \cdot \rho}{\tau \cdot 6 \cdot 10^4}, \quad (5.16)$$

где ρ - плотность теплоносителя, кг/м³.

Площадь поперечного сечения внутренней трубы и межтрубного пространства

$$f_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}; \quad (5.17)$$

$$f_2 = \frac{\pi}{4} (D^2 - d_2^2). \quad (5.18)$$

Скорость движения теплоносителей

$$\omega = \frac{M}{f \cdot \rho} \quad (5.19)$$

По (5.4) - (5.6) определяем числа Re и Nu .

По числу Нуссельта определяем α_1 и α_2 , а затем по (5.3) - коэффициент теплопередачи.

Значение k находим в следующей последовательности.

Определяем средний или среднелогарифмический температурный напор (5.12)-(5.13). Рассчитываем Q_1 и Q_2 (5.14)-(5.15) и их среднее значение

$$Q = \frac{Q_1 + Q_2}{2}. \quad (5.20)$$

Определяем поверхность теплообмена трубы

$$F = \pi d \ell, \quad (5.21)$$

где ℓ - длина теплообменника, $\ell = 1,2$ м.

Окончательно по (5.11) рассчитываем коэффициент теплопередачи. Результаты расчета коэффициентов теплопередачи сводим в табл. 5.2, 5.3 5.4.

Таблица 5.2

Результаты промежуточных расчетов

Расход теплоносителя, кг/с		Площадь сечения, м ²		Скорость течения теплоносителя, м/с		Определяющая температура теплоносителя, °С		Определяющий размер, м	
M ₁	M ₂	f ₁	f ₂	ω ₁	ω ₂	t _{ж1}	t _{ж2}	d ₁	d _{жж}

Таблица 5.3

Результаты расчета по критериальным уравнениям

Числа подобия								Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² ·К)		Коэффициент теплопередачи k, Вт/(м ² ·К)
при расчете α ₁				при расчете α ₂				α ₁	α ₂	
Re _ж	Pr _ж	Cr _ж	Pr _c	Nu _ж	Re _ж	Pr _ж	Pr _c	Nu _ж	α ₁	α ₂

Результаты расчета по тепловым балансам

Количество теплоты, Вт			Среднелогарифмический температурный напор $\Delta t_{\text{ср}}$, °C	Коэффициент теплопередачи k , Вт/(м ² ·K)
отданное первичным теплоносителем Q_1	полученное вторичным теплоносителем Q_2	среднее Q		

По результатам расчета формулируем выводы.

5.5. Контрольные вопросы

1. Принципы конструкторского и поверочного расчетов теплообменника.
2. Преимущества и недостатки прямоточной и противоточной схем движения теплоносителей.
3. От чего зависит изменение температур теплоносителей при прямотоке и противотоке?
4. Основные уравнения для расчета теплоотдачи при течении жидкости в канале.
5. Влияние основных факторов на коэффициент теплопередачи.

Значения функции $\operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{at}}$

№ пп	$\frac{x}{2\sqrt{at}}$	$\operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{at}}$	№ пп	$\frac{x}{2\sqrt{at}}$	$\operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{at}}$	№ пп	$\frac{x}{2\sqrt{at}}$	$\operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{at}}$	№ пп	$\frac{x}{2\sqrt{at}}$	$\operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{at}}$
1	0,00	0,564	21	0,20	0,387	41	0,40	0,252	61	0,76	0,102
2	0,01	0,554	22	0,21	0,379	42	0,41	0,247	62	0,78	0,097
3	0,02	0,544	23	0,22	0,371	43	0,42	0,341	63	0,80	0,091
4	0,03	0,535	24	0,23	0,364	44	0,43	0,235	64	0,82	0,086
5	0,04	0,525	25	0,24	0,356	45	0,44	0,230	65	0,84	0,081
6	0,05	0,515	26	0,25	0,349	46	0,45	0,225	66	0,86	0,077
7	0,06	0,506	27	0,26	0,342	47	0,46	0,214	67	0,88	0,072
8	0,07	0,497	28	0,27	0,335	48	0,47	0,205	68	0,90	0,068
9	0,08	0,488	29	0,28	0,328	49	0,52	0,190	69	0,92	0,064
10	0,09	0,497	30	0,29	0,321	50	0,54	0,181	70	0,94	0,061
11	0,10	0,470	31	0,30	0,314	51	0,56	0,172	71	0,96	0,057
12	0,11	0,461	32	0,31	0,308	52	0,58	0,164	72	0,98	0,044
13	0,12	0,452	33	0,32	0,301	53	0,60	0,156	73	1,00	0,050
14	0,13	0,444	34	0,33	0,295	54	0,62	0,148	74	1,20	0,026
15	0,14	0,435	35	0,34	0,289	55	0,64	0,141	75	1,40	0,013
16	0,15	0,427	36	0,35	0,282	56	0,66	0,134	76	1,60	0,006
17	0,16	0,419	37	0,36	0,276	57	0,68	0,127	77	1,80	0,003
18	0,17	0,410	38	0,37	0,272	58	0,70	0,120	78	2,00	0,001
19	0,18	0,402	39	0,38	0,264	59	0,72	0,114			
20	0,19	0,394	40	0,39	0,258	60	0,74	0,108			

Таблица П2

Физические параметры сухого воздуха при давлении 0,1015 МПа (760 мм рт.ст.)

t , °C	ρ , кг/м ³	C_p , кДж/кг	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^5$, м ² /с	$\mu \cdot 10^6$, с/м ²	$\nu \cdot 10^{-6}$, м ² /с	Pr
-30	1,453	1,013	2,20	1,492	15,70	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	1,620	16,19	12,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	1,745	16,68	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	1,881	17,17	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	2,006	17,66	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,69	2,142	18,15	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	2,286	18,64	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	2,431	19,13	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	2,572	19,62	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	2,720	20,11	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,97	2,856	20,60	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	3,020	21,09	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	3,189	21,48	22,10	0,690
100	0,940	1,009	3,21	3,364	21,88	23,13	0,638
120	0,898	1,009	3,34	3,684	12,86	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	4,034	23,73	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	4,389	24,52	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	4,750	25,31	32,49	0,681
200	0,776	1,026	3,93	5,136	26,00	34,85	0,680

Степень черноты полного нормального излучения материала

№ пп	Наименование материала	t, °C	ε
1	Алюминий: шероховатый	20...50	0,055
	окисленный	" "	0,15
	полированный	" "	0,048
2	Алюминиевая краска	50	0,5
3	Асбестовый картон	20	0,96
4	Асбошифер	20	0,96
5	Бетон	20	0,8
6	Вода (слой толщиной 0,1 мм и более)	50	0,95
7	Железо литое необработанное		0,91
8	Кирпич красный шероховатый	20	0,88...0,93
9	Кирпич огнеупорный	500...1000	0,65...0,75
10	Кирпич шамотный	20	0,85
11	Латунь: окисленная		0,6
	полированная		0,03
	прокатанная		0,20
12	Масляная краска		0,94
13	Медь: окисленная		0,62
	полированная		0,02
14	Никель окисленный		0,4
15	Нихромовая проволока		0,96
16	Серебро полированное		0,02
17	Сталь: окисленная		0,80
	окисленная шероховатая	80	0,95
	полированная	750...1050	0,52...0,56
	ржавая красная	20	0,69
18	Снег		0,96
19	Стекло	20...100	0,94...0,91
		250...1000	0,87...0,72
		1100...1500	0,7...0,67
20	Толь	20	0,91...0,93
21	Хром	20	0,17
22	Чугун: обточенный		0,65
	шероховатый окисленный		0,96
23	Шлак котельный	0...100	0,97...0,93
		200...500	0,89...0,78
		600...1200	0,76...0,70
		1400...1800	0,69...0,67

Физические свойства воды на линии насыщения

t , °C	P_n , МПа	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	C_p , кДж/(кг·К)	h' , кДж/кг	$a \cdot 10^7$, м ² /с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$\beta \cdot 10^4$, 1/к	Pr
0	0,10132	999,9	0,560	4,210	0,006	1,31	1,789	0,63	13,60
10	0,10132	999,7	0,580	4,204	42,04	1,38	1,306	0,70	9,52
20	0,10132	998,2	0,597	4,195	83,90	1,43	1,006	1,82	7,02
30	0,10132	995,7	0,612	4,190	125,71	1,47	0,805	3,21	5,45
40	0,10132	992,2	0,627	4,187	167,50	1,51	0,658	3,87	4,36
50	0,10132	988,1	0,640	4,186	209,30	1,55	0,556	4,49	3,59
60	0,10132	983,2	0,650	4,185	251,13	1,58	0,478	5,11	3,03
70	0,10132	977,8	0,662	4,186	293,01	1,61	0,415	5,70	2,58
80	0,10132	971,6	0,669	4,187	334,95	1,63	0,365	6,32	2,23
90	0,10132	965,3	0,676	4,189	376,98	1,65	0,326	6,25	1,96
100	0,10132	958,4	0,684	4,191	419,11	1,68	0,295	7,52	1,75
110	0,14326	951,0	0,685	4,194	461,36	1,70	0,272	8,08	1,60
120	0,19854	943,1	0,686	4,190	303,76	1,71	0,252	8,64	1,47
130	0,20711	934,8	0,686	4,203	546,35	1,73	0,233	9,19	1,35
140	0,36136	926,1	0,685	4,208	539,15	1,72	0,217	9,72	1,26
150	0,45970	917,0	0,684	4,214	632,19	1,73	0,203	10,30	1,17
160	0,61894	907,4	0,681	4,222	675,51	1,72	0,191	10,70	1,10
170	0,79203	897,3	0,676	4,230	719,15	1,72	0,181	11,30	1,05
180	1,00270	886,0	0,672	4,240	763,15	1,72	0,173	11,90	1,03
190	1,25520	876,0	0,664	4,250	807,55	1,71	0,165	12,60	0,97
200	1,55500	863,0	0,658	4,262	852,41	1,70	0,158	13,30	0,93

Сухой насыщенный пар и вода на кривой насыщения (по температурам)

t , °C	P , МПа	V' , м ³ /кг	V'' , м ³ /кг	ρ , кг/м ³	h' , кДж/кг	h'' , кДж/кг	r , кДж/кг	S' , кДж/кг·К	S'' , кДж/кг·К
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,0006108	0,0010002	206,300	0,004847	0,00	2500,8	2500,8	0	9,1544
5	0,0008718	0,0010001	147,200	0,006793	21,06	2510,0	2489,0	0,0762	9,0242
10	0,0012271	0,0010004	106,420	0,009398	42,04	2519,2	2477,3	0,1511	8,8995
15	0,001704	0,0010010	77,970	0,01282	62,97	2528,4	2465,4	0,2244	8,7806
20	0,002337	0,0010018	57,840	0,01729	83,50	2537,2	2453,4	0,2964	8,6663
25	0,003167	0,0010039	43,400	0,02304	104,80	2546,4	2441,7	0,3672	8,5570
30	0,004241	0,0010044	32,930	0,03036	125,69	2555,6	2430,0	0,4367	8,4523
35	0,005622	0,0010060	25,250	0,03960	146,58	2564,8	2418,3	0,5049	8,3518
40	0,007375	0,0010079	19,550	0,05115	167,51	2573,6	2406,1	0,5723	8,2560
45	0,009582	0,0010099	15,280	0,06545	188,41	2582,4	2394,0	0,6385	8,1638
50	0,012335	0,0010121	12,060	0,08302	209,30	2591,6	2382,3	0,7038	8,0751
55	0,015741	0,0010145	9,578	0,1044	230,19	2600,4	2370,1	0,7679	7,9901
60	0,01992	0,0010171	7,678	0,1302	251,12	2609,2	2358,0	0,8311	7,9084
65	0,02501	0,0010199	6,201	0,1613	272,06	2617,6	2345,4	0,8935	7,8297
70	0,03116	0,0010228	5,045	0,1982	292,99	2626,4	2333,3	0,9550	7,7544
80	0,04736	0,0010290	3,409	0,2933	334,94	2643,1	2308,2	1,0752	7,6116
90	0,07011	0,0010359	2,361	0,4235	376,98	2659,5	2282,5	1,1924	7,4785
100	0,10132	0,0010435	1,673	0,5977	419,10	2675,8	2256,7	1,3071	7,3545
110	0,14327	0,0010515	1,210	0,8263	461,34	2691,3	2230,0	1,4185	7,2386
120	0,19845	0,0010603	0,891	1,122	503,70	2706,3	2202,7	1,5278	7,1289
130	0,27011	0,0010697	0,6683	1,496	546,4	2720,6	2174,2	1,6345	7,0271

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
140	0,3614	0,0010798	0,5087	1,966	589,1	2734,0	2144,9	1,7392	6,9304
150	0,4760	0,0010906	0,3926	2,547	632,2	2746,5	2114,3	1,8418	6,8383
160	0,6180	0,0011021	0,3068	3,269	675,3	2757,8	2082,5	1,9427	6,7508
170	0,7920	0,0011144	0,2426	4,122	719,3	2768,4	2049,4	2,0419	6,6666
180	1,0027	0,0011275	0,1939	5,157	763,3	2778,4	2015,1	2,1395	6,5858
190	1,2553	0,0011415	0,1564	6,395	807,6	2786,3	1978,7	2,2358	6,5075
200	1,5550	0,0011565	0,1272	7,863	852,4	2793,0	1940,6	2,3308	6,4318
210	1,9080	0,0011726	0,1044	9,578	897,6	2798,0	1900,4	2,4246	6,3577
220	2,3202	0,0011900	0,08606	11,62	943,7	2801,4	1857,7	2,5179	6,2848
230	2,7979	0,0012087	0,07147	13,99	990,2	2003,1	1812,9	2,6101	6,2132
240	3,3480	0,0012291	0,05967	16,76	1037,5	2803,1	1765,6	2,7022	6,1425
250	3,978	0,0012312	0,05005	19,98	1086,1	2801,1	1714,9	2,7934	6,0721
260	4,694	0,0012755	0,04215	23,72	1135,0	2798,3	1661,4	2,8851	6,0014
270	5,505	0,0013023	0,3560	28,09	1185,3	2789,7	1604,4	2,9764	5,9764
280	6,419	0,0013321	0,03013	33,19	1236,8	2779,6	1542,8	3,0685	5,8573
290	7,445	0,0013655	0,02553	39,17	1290,0	2766,2	1476,3	3,1610	5,7049
300	8,592	0,0014036	0,02164	46,21	1344,8	2749,1	1404,3	3,2548	5,7049
310	9,869	0,001447	0,01831	54,61	1402,2	2717,3	1325,1	3,3507	5,6233
320	11,290	0,001499	0,01545	64,74	1462,0	2699,6	1237,6	3,1495	5,5354
330	12,664	0,001562	0,01297	77,09	1526,1	2665,7	1139,6	3,5521	5,4412
340	14,608	0,001639	0,01078	92,77	1594,8	2621,8	1027,0	3,6605	5,3361
350	16,537	0,001741	0,008805	113,8	1671,4	2564,4	893,0	3,7786	5,2117
360	18,674	0,001894	0,006943	144,1	1761,4	2481,1	719,7	3,9163	5,0530
370	21,053	0,00222	0,00493	202,4	1892,4	2330,8	438,4	4,1135	4,7951
374	22,087	0,00280	0,00361	277,0	2031,9	2171,7	139,8	4,3258	4,5418

Насыщенный водяной пар (аргумент-давления)











P_s , МПа	t_s , °C	v' , м ³ /кг	v'' , м ³ /кг	ρ_s , кг/м ³	h' , кДж/кг	h'' , кДж/кг	r , кДж/кг	S' , кДж/кг·К	S'' , кДж/кг·К
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
0,0010	5,736	0,00100001	190,04	0,007890	29,18	2513,4	2484,2	0,1053	8,9749
0,0020	17,435	0,00100002	167,24	0,01487	73,40	2533,1	2459,7	0,2603	7,7227
0,0030	21,071	0,00100021	154,42	0,01838	88,36	2539,5	2451,1	0,3119	8,6424
0,0040	24,078	0,00100028	145,77	0,02185	100,93	2545,3	2444,4	0,3547	8,5784
0,0050	29,95	0,00100042	134,97	0,02860	121,23	2553,7	2432,5	0,4225	8,4737
0,0060	32,89	0,00100054	128,24	0,03541	137,79	2560,9	2423,1	0,4764	8,3943
0,0066	36,17	0,00100065	123,77	0,04208	151,49	2567,1	2415,6	0,5209	8,3297
0,0070	41,53	0,00100085	118,13	0,05516	173,80	2376,4	2402,5	0,5919	8,2263
0,008	45,82	0,00100102	114,70	0,06805	191,84	2583,9	2392,1	0,6496	8,1494
0,010	52,57	0,00100132	10,69	0,09353	220,05	2596,1	2376,0	0,7368	8,0305
0,015	57,82	0,00100159	8,448	0,1184	242,03	2605,4	2363,3	0,8040	7,9445
0,020	59,08	0,00100171	7,657	0,1397	251,48	2609,2	2357,7	0,8324	7,9075
0,025	64,09	0,00100198	6,261	0,1613	272,03	2617,6	2343,5	0,8934	7,8300
0,030	69,12	0,00100223	5,232	0,1911	289,30	2624,6	2335,3	0,9441	7,7673
0,040	75,87	0,00100264	3,999	0,2501	317,62	2636,3	2318,7	1,0261	7,6710
0,050	81,33	0,0010299	3,243	0,3083	340,53	2645,2	2304,7	1,0912	7,5923
0,060	85,94	0,0010350	2,754	0,3558	359,90	2553,1	2293,2	1,1453	7,5313
0,080	92,50	0,0010385	2,089	0,4787	391,75	2665,3	2273,5	1,2331	7,4342
0,100	99,62	0,0010432	1,596	0,5896	417,47	2674,9	2257,9	1,3026	7,3679
0,12	104,80	0,0010472	1,430	0,6992	439,34	2683,6	2243,6	1,3610	7,2972

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.16	113,31	0,0010543	1,092	0,9160	475,41	2696,3	2220,8	1,4550	7,2017
0.20	120,23	0,0010606	0,8860	1,129	504,74	2706,8	2202,0	1,5306	7,1279
0.26	128,73	0,0010684	0,6929	1,443	541,2	2718,9	2177,7	1,6213	7,0399
0.30	133,54	0,0010733	0,6055	1,652	561,7	2725,5	2163,9	1,6716	6,9922
0.40	143,62	0,0010836	0,4623	2,163	604,3	2738,7	2134,1	1,7766	6,8969
0.50	161,84	0,0010927	0,3749	2,667	640,1	2748,8	2108,7	1,8605	6,8221
0.60	158,84	0,0011009	0,3156	3,169	670,6	2756,9	2086,2	1,9311	6,7609
0.80	170,41	0,0011149	0,2403	4,161	720,9	2769,0	2048,1	0,0461	6,6630
1.00	179,88	0,0011273	0,1945	5,143	762,4	2777,8	2015,3	2,1383	6,5867
1.20	187,95	0,0011385	0,1633	6,125	798,4	2784,6	1986,2	2,2156	6,5244
1.40	195,04	0,0011488	0,1408	7,102	830,0	2789,7	1959,7	2,2841	6,4699
1.60	201,36	0,0011587	0,1238	8,080	858,3	2793,5	1035,2	2,3437	6,4221
1.80	207,10	0,0011678	0,1104	9,055	884,2	2796,5	1912,3	2,3975	6,3794
2.00	212,37	0,0011768	0,09961	10,04	908,6	2799,2	1890,7	2,4471	6,3411
2.40	221,77	0,0011932	0,08324	12,01	951,8	2301,8	1850,0	2,5346	6,2727
2.80	230,04	0,012088	0,07142	14,00	990,2	2803,1	1812,8	2,6101	6,2129
3.00	233,82	0,0012164	0,06663	15,01	1008,4	2803,5	1794,7	2,6456	6,1859
3.50	242,54	0,0012344	0,05706	17,53	1049,8	2802,8	1753,0	2,7251	6,1242
4.00	250,33	0,0012520	0,04977	20,09	1087,5	2800,6	1713,2	2,7965	6,0689
5.00	263,91	0,0012838	0,03943	25,36	1154,2	2793,9	1639,6	2,9210	5,9739
6.00	275,56	0,0013185	0,03243	30,84	1213,9	2784,4	1970,5	3,0276	5,8894
7.00	285,80	0,0013510	0,02738	36,53	1267,6	2772,3	1504,7	3,1221	5,8143
8.00	294,98	0,0013838	0,02352	42,52	1317,3	2758,6	1441,2	3,2079	5,7448
9.00	303,31	0,0014174	0,02049	48,80	1363,9	2742,6	1378,8	3,2866	5,6783
10.00	310,96	0,0014522	0,01803	55,47	1407,9	2724,8	1310,9	3,3601	5,6147

Продолжение табл. П.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11,00	318,04	0,0014886	0,01597	62,62	1450,2	2705,2	1255,0	3,4297	5,5528
12,00	324,64	0,001527	0,01426	70,15	1491,1	2684,6	1193,5	3,4966	5,4930
13,00	330,81	0,001568	0,01278	78,22	1531,3	2662,3	1131,1	3,5606	5,4333
14,00	336,63	0,001611	0,01149	87,04	1570,8	2637,9	1067,0	3,6244	5,3731
16,00	347,32	0,001710	0,009319	107,3	1649,6	2581,7	932,1	3,7456	5,2478
18,00	356,96	0,001839	0,007505	133,2	1732,2	2510,6	778,4	3,8708	5,1054
20,00	365,72	0,00203	0,00586	170,5	1826,8	2410,3	583,44	4,0147	4,9280
22,00	373,71	0,00269	0,00378	265	2009,7	2195,6	185,9	4,2943	4,5815

Условные обозначения.

-  - прибор для измерения температуры многоточечный
-  - термометр "
-  - вольтметр
-  - амперметр
-  - нагреватель
-  - электродвигатель
-  - трансформатор
-  - термометр ртутный
-  - термометр с электропередачей (контактный термометр)
-  - рожок

Содержание

Общие указания	3
Основные правила техники безопасности	3
Лабораторная работа №1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕМПЕРАТУРО- ПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ РЕГУЛЯРНОГО РЕЖИМА	4
Лабораторная работа №2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПОЛУОГ- РАНИЧЕННОГО ТЕЛА ПРИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ВТОРОГО РОДА	10
Лабораторная работа №3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ ОДИНОЧНОЙ ТРУБЫ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕК- ЦИИ В НЕОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ	16
Лабораторная работа №4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИНЫ МЕТОДОМ СРАВНЕНИЯ	24
Лабораторная работа №5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ВОДОВОДЯНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА	30
ПРИЛОЖЕНИЕ	41