№ 2342

621.1 T 382

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА И ОСНОВЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Сборник лабораторных работ

Методические указания

Новосибирск, 2002

№ 2342

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА И ОСНОВЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Сборник лабораторных работ

Методические указания для студентов ФЭН всех форм обучения

Новосибирск, 2002

УДК 621.1.016.7 + 536.24 (076.5) Т 382

Составили: к.т.н., доц. Ю.И.Шаров, к.т.н., доц. П.А.Щинников

Рецензент: д.т.н., проф. Ю.В.Овчинников

Работа подготовлена на кафедре тепловых электрических станций

Новосибирский государственный технический университет

Оглавление

Лабораторная работа №1	. 5
Лабораторная работа №2	11
Лабораторная работа №3	16
Лабораторная работа №4	24
Лабораторная работа №5	30
Лабораторная работа №6	37
Литература	44
Лабораторная работа №2 Лабораторная работа №3 Лабораторная работа №4 Лабораторная работа №5 Лабораторная работа №6 Литература	11 16 24 30 37 44

Лабораторная работа №1

Определение массовой изобарной теплоемкости воздуха

Теплоемкость – это теплота, которую необходимо подвести к единичному количеству вещества, чтобы нагреть его на 1 К. Единичное количество вещества можно измерить в килограммах, кубометрах при нормальных физических условиях и киломолях. Киломоль газа – это масса газа в килограммах, численно равная его молекулярной массе. Таким образом, существует три вида теплоемкостей: массовая *с* Дж/(кг·К); объемная *с'* Дж/(м³·К) и мольная µ*c* Дж/(кмоль·К). Поскольку киломоль газа имеет массу в µ раз выше одного килограмма, отдельного обозначения для мольной теплоемкости не вводят, отсюда легко выводится связь между теплоемкостями

$$c = \frac{\mu c}{\mu}; c' = \frac{\mu c}{22.4}; c' = c \cdot \rho_0,$$
(1)

где $\mu \upsilon_0 = 22.4 \, \text{м}^3$ /кмоль – объем киломоля идеального газа при нормальных физических условиях;

ρ₀, кг/ м³ – плотность газа при нормальных физических условиях.

Истинная теплоемкость газа – это производная от теплоты по температуре

$$c = \frac{dq}{dt} = \frac{dq}{dT}$$
(2)

Теплота зависит от термодинамического процесса и определяется по 1му закону термодинамики для изохорного и изобарного процессов

$$dq_V = du = c_V dT \tag{3}$$

$$dq_P = du + Pdv = c_V dT + RdT = (c_V + R)dT = c_P dT$$
(4)

Здесь $dq_P = c_P dT$ – теплота, подведенная к 1 кг газа в изобарном процессе; $du = c_V dT$ – изменение внутренней энергии газа; Pdv = RdT – работа газов против внешних сил.

По существу (4) формулирует 1-е начало термодинамики, откуда следует уравнение Майера

$$c_P = c_V + R \tag{5}$$

Если положить dT = 1 К, то Pdv = R, то есть физический смысл газовой постоянной – это работа 1 кг газа в изобарном процессе при изменении его температуры на 1 К.

Уравнение Майера для 1 кмоля газа имеет вид

$$\mu c_{\rm P} = \mu c_{\rm V} + \mu R_{\rm L} \tag{6}$$

где $\mu R = 8314$ Дж/(кмоль-К) – универсальная газовая постоянная.

Кроме уравнения Майера, изобарная *c*_{*P*} и изохорная *c*_{*V*} массовые теплоемкости газов связаны между собой через показатель адиабаты *k*

$$k = \frac{c_P}{c_V} \tag{7}$$

Значения показателя адиа	баты для идеальных газов	Таблица 1
Атомность газов	k	
1-атомные газы	1,67	
2-атомные газы	1,40	
3-х и многоатомные газы	1,29	

Цель работы

Закрепление теоретических знаний по основным законам термодинамики. Практическое освоение метода определения теплоемкости воздуха на основе энергетического баланса.

Экспериментальное определение удельной массовой теплоемкости воздуха и сопоставление полученного результата со справочным значением.

Методика выполнения работы



Рис.1. Схема экспериментальной установки:

1 – труба; 2 – конфузор; 3 – вентилятор; 4 – трубка для измерения динамического напора; 5 – патрубок; 6, 7 – дифманометры (тягоуровнемеры); 8 – термопара; 9 – потенциометр; 10 – изоляция; 11 – электронагреватель; 12 – лабораторный автотрансформатор (ЛАТР); 13 – вольтметр; 14 – амперметр; 15 – термометр

1. Описание лабораторной установки

Установка (рис.1) состоит из латунной трубы 1 ($d_{\rm BH}$ =0,022 м), на конце которой расположен электронагреватель 11 с тепловой изоляцией 10. Внутри трубы движется поток воздуха, который подается вентилятором 3. Расход воздуха может регулироваться изменением числа оборотов вентилятора. В трубе 1 установлена трубка полного напора 4 и статического давления 5, которые подсоединены к дифференциальным манометрам (тягоуровнемерам) 6 и 7. Кроме того, в трубе 1 установлена термопара 8, которая может перемещаться по сечению одновременно с трубкой полного давления. Величина ЭДС термопары определяется по потенциометру 9. Нагрев воздуха, движущегося по трубе, регулируется с помощью лабораторного автотрансформатора (ЛАТРа) 12 путем изменения мощности нагревателя, которая определяется по показаниям амперметра 14 и вольтметра 13. Температура воздуха на выходе из нагревателя определяется термометром 15.

2. Методика проведения эксперимента

Тепловой поток нагревателя, Вт

$$Q = \eta_{\rm T} I U \cos \varphi \,. \tag{8}$$

где *I*, А – сила тока;

U, В — напряжение;

*cos*φ=0,96;

η_T=0,94 – коэффициент тепловых потерь.

Тепловой поток, воспринятый воздухом, Вт

$$Q = Gc_P(t_{\rm BMX} - t_{\rm BX}), \tag{9}$$

где G, кг/с – массовый расход воздуха;

^С_Р – экспериментальная массовая изобарная теплоемкость воздуха, Дж/кг·К; *t*_{вых}, *t*_{вх}, °С – температура воздуха на выходе из нагревательного участка и входе в него.

Массовый расход воздуха, кг/с

$$G = \omega_{\rm CP} \, \frac{\pi d^2}{4} \rho_{\rm , \ \kappa r/c} \tag{10}$$

где ω_{CP} , м/с – средняя скорость воздуха;

d, м – внутренний диаметр трубы;

 ρ – плотность воздуха при температуре $t_{\rm BMX}$, кг/м³

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{273}{237 + t_{\text{BMX}}} \cdot \frac{B + \frac{P_{\text{cT}}}{13.6}}{760}.$$
 (11)

Здесь $\rho_0 {=}\, 1{,}293$ кг/м 3 – плотность воздуха при нормальных физических условиях;

В – барометрическое давление, мм.рт.ст;

*P*_{ст} – избыточное статическое давление воздуха в трубе, мм.вод.ст.

Скорости *ω_i* воздуха определяются по динамическому напору в 4-х равновеликих сечениях (см. лаб. работу №6), м/с

$$\omega_i = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot h_{\text{дин}}}{\rho}}, \qquad (12)$$

где *h*_{дин} – динамический напор, мм.вод.ст. (кг/м²), умножение которого на ускорение свободного падения *g*=9,81 м/с² является переводом давления в H/м², ведь динамический напор – это кинетическая энергия воздушного потока, которая в Международной Системе Единиц, для 1 кг воздуха имеет вид, H/м²

$$P_{\rm g} = \frac{\rho \cdot w_i^2}{2} \,. \tag{13}$$

Средняя изобарная массовая теплоемкость воздуха определяется из формулы (9), в которую тепловой поток подставляется из уравнения (8). Точное значение теплоемкости воздуха при средней температуре $t_{\rm CP} = 0.5(t_{\rm вых} + t_{\rm вx})$ находится по таблице средних теплоемкостей или по эмпирической формуле (см. лаб. работу №6), Дж/(кг-К)

$$c_P^* = 1002,7 + 0,027 \cdot t_{\rm CP} \,. \tag{14}$$

После чего определяется относительная погрешность

$$\delta c = \frac{c_P - c_P^*}{c_P} \cdot 100 \tag{15}$$

3. Проведение эксперимента и обработка результатов измерений

Эксперимент проводится в следующей последовательности.

- 1. Устанавливается какой-либо режим работы (задается преподавателем).
- На этом режиме измеряется динамический напор воздуха в 4 точках, которые расположены на средних диаметрах равновеликих сечений рабочей трубы (рис.3, лаб. раб. №6). Эти точки отмечены на рейке, которая перемещает по вертикали трубку полного напора.
- 3. Измеряется статический напор *P*_{ст}.

- 4. Измеряются:
 - сила тока *I* , A;
 - напряжение *U*, B;

 - температура *t*_{вх}, °С (термопара *8*);
 температура *t*_{вых}, °С (термометр *15*).
- 5. Измеряется барометрическое давление *В*, мм рт.ст.
- 6. Эксперимент повторяется для следующего режима, который задается изменением мощности нагрева и числа оборотов вентилятора.
- 7. Результаты измерений заносят в табл.1.
- 8. Проводят расчет. Результаты расчета заносят в табл.2.

	Таблица измерений	Габлица 1			
NI-		Режимы			
IN≌	паименование величины	Ι	II		
1	Температура воздушного потока на входе <i>t</i> _i , °C	1) 2) 3) 4)	1) 2) 3) 4)		
2	Температура воздуха на выходе <i>t</i> вых, °С				
3	Динамический напор в выходном сечении <i>h</i> _д , мм вод. ст. (в четырех точках сечения)	1) 2) 3) 4)	1) 2) 3) 4)		
4	Избыточное статическое давление в выходном сечении <i>P</i> _{ст} , мм вод.ст.				
5	Барометрическое давление В, мм рт. ст.				
6	Сила тока <i>I</i> , А				
7	Напряжение U, B				

	Таблица 2				
No	Наименорацие релиции	Формула	Режимы		
IN≌	Паименование величин	Φορικιγπα	Ι	II	
1	2	3	4	5	
1	Динамический напор в выходном сечении $P_{{\rm Д}},$ Н/м ²	$P_{\rm I\!I} = 9,81 h_{\rm I\!I}$	1) 2) 3) 4)	1) 2) 3) 4)	
2	Средняя температура потока на входе ^{<i>t</i>} _{вх} , °С	$t_{\rm BX} = \frac{\sum t_i}{4}$			
3	Плотность воздуха в выходном сечении р, кг/м ³	$ \rho = \rho_0 \frac{273}{273 + t_{\text{вых}}} \cdot \frac{B + \frac{P_{\text{ст}}}{13,6}}{760} $ где $ \rho_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3 - \text{плотность воз-} $ духа при нормальных условиях			

4	Скорости потока в вы- ходном сечении по точ- кам измерений ω_i , м/с	$\omega_i = \sqrt{\frac{2P_{\mathcal{I}}}{\rho}}$	1) 2) 3) 4)	1) 2) 3) 4)
5	Средняя скорость пото- ка _{Фср} , м/с	$\omega_{\rm cp} = \frac{\sum \omega_i}{4}$		
6	Объемный расход воз- духа <i>V</i> , м ³ /с	$V = f\omega_{\rm cp} = \frac{\pi}{4}d_{\rm BH}^2\omega_{\rm cp}$		
7	Массовый расход воз- духа <i>G</i> , кг/с	$G = V \rho$		
8	Средняя температура воздуха в трубе <i>t</i> _{CP} , °C	$t_{\rm CP} = 0.5 \cdot (t_{\rm BX} + t_{\rm Bbix})$		
9	Теплота, отданная стенкой трубы потоку воздуха <i>Q</i> , Вт	$Q = \eta_{\mathrm{T}} IU \cos \phi_{, \mathrm{где}} \eta_{\mathrm{T}=0,94, \mathrm{cos}\phi=0,96}$		
10	Экспериментальное значение теплоемкости <i>c</i> _P , Дж/(кг·К)	$c_P = \frac{Q}{G(t_{\rm bbix} - t_{\rm bx})}$		
11	Средняя массовая изо- барная теплоемкость воздуха ^с [*] _P , Дж/(кг·К)	$c_P^* = 1002, 7 + 0,027t_{CP}$		
12	Справочное значение теплоемкости с _{СПР} , Дж/(кг·К)	1005		
13	Относительная погрешность δ <i>c</i> , %	$\delta c = \frac{c_P - c_P^*}{c_P} 100_{\%}$		

Контрольные вопросы

- 1. Какой (какие) фундаментальные законы природы лежат в основе работы установки и в основе проведения эксперимента?
- 2. Объясните физический смысл теплоемкости.
- 3. Какие виды теплоемкости вы можете назвать? В чем их отличие?
- 4. Поясните взаимосвязь первого начала термодинамики и изобарной теплоемкости.
- 5. В чем заключается суть эксперимента?
- 6. С какой целью при изменении режима нагрева изменяют режим работы вентилятора?
- 7. С какой целью в эксперименте определяют барометрическое давление?
- 8. Чем объясняется наличие (отсутствие) относительной погрешности при определении изобарной теплоемкости воздуха и чем объясняется расхождение полученных экспериментально значений от справочного?

Лабораторная работа №2

Определение показателя адиабаты для воздуха

Клеман и Дезорм в 1819 г. предложили и осуществили следующий метод измерения отношения теплоемкости при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме для газов

$$k = \frac{c_P}{c_V} \tag{1}$$

Предположим, что газ находится в закрытом сосуде при давлении выше

атмосферного. Температура газа равна температуре окружающей среды T_{st} . Пусть это состояние будет обозначено как состояние 1 и в этом состоянии газ будет характеризовать также и объем.

Состояние 1: *P*₁, *T*_{*}, *V*₁ (точка 3, рис.1).

Если теперь быстро сбросить давление, т. е. открыть кран, соединяющий полость сосуда с атмосферой на короткое время, то часть газа выйдет из сосуда. В результате установится состояние 2, при котором все параметры газа изменятся.

Состояние 2: *P*_{*}, *T*₂, *V*₂ (точка 4, рис.1).

В этом состоянии давление в сосуде будет равно атмосферному, а температура – ниже атмосферной. Если открытие крана было очень коротким по времени и выход газа был достаточно энергичным, то процесс перехода из состояния 1 в состояние 2 можно считать достаточно приближенным к адиабатному, который, как известно, происходит без теплообмена с окружающей средо



Рис.1. РУ-диаграмма опыта: 1-2 – заполнение сосуда воздухом; 2-3 – выравнивание температур; 3 – состояние 1; 3-4 – адиабатическое расширение; 4 – состояние 2; 4-5 – выравнивание температур; 5 - состояние 3; t_*, P_* температура и давление окружающей среды

$$PV^k = const$$
. (2)

Вслед за кратковременным достижением состояния 2 наблюдается переход в состояние 3. При этом газ, находящийся в сосуде, нагревается от окружающей среды через стенки сосуда. Температура и давление газа растут, и через некоторое время его температура становится равной температуре окружающей среды T_* , наступает состояние 3.

Состояние 3: *P*₂, *T*_{*}, *V*₂ (точка 5, рис.1).

РV-диаграмма (рис.1) иллюстрирует процессы, проводимые в опыте Клемана и Дезорма.

Рассмотрим процессы, проходящие в этом опыте. Кратковременный адиабатный процесс опишется дифференциальным уравнением

$$kPV^{k-1}dV + V^k dP = 0 ag{3}$$

или после деления на V^{k-1}

$$kPVdV + VdP = 0 \tag{4}$$

В этом процессе приближенно можно принять $dV = V_2 - V_1$, $dP = P_2 - P_1$. Тогда

$$kP_1(V_2 - V_1) + V_1(P_* - P_1) = 0.$$
(5)

В состоянии 1 и 3 температура газа одна и та же T_* . Поэтому из состояния 1 в состояние 3 можно перейти *изотермически*. В этом случае уравнение имело бы вид

$$PV = const$$
 (6)

или, после дифференцирования,

$$PdV + VdP = 0. (7)$$

При гипотетическом изотермическом переходе из состояния 1 в состояние 3 дифференциалы равны $dV = V_2 - V_1$, $dP = P_2 - P_1$, т. е.

$$P_1(V_2 - V_1) + V_1(P_2 - P_1) = 0$$
(8)

Используя уравнение (5) и уравнение (8), получим выражение для определения показателя адиабаты *k* (который одновременно является отношением теплоемкостей) в опыте Клемана и Дезорма:

$$k = \frac{P_1 - P_*}{P_1 - P_2}$$
 (9)

Методика выполнения работы

1. Описание лабораторной установки

Экспериментальная установка в опыте Клемана и Дезорма представлена на рис.2. Установка состоит из стеклянной колбы 1, трехходового крана 2, дифференциального манометра (водоуказательное стекло) 3, ручного насоса (груша) 4 и выхлопного клапана 5. Все основные элементы установки соединены между собой шлангами.



Рис.2. Схема экспериментальной установки

Трехходовой кран имеет три рабочих положения: в первом положении воздух из атмосферы закачивается насосом в колбу, во втором положении все рабочие каналы перекрыты, в третьем положении воздух из колбы выпускается в атмосферу через выхлопной клапан.

Изменение уровня столба воды в дифференциальном манометре показывает давление воздуха в колбе.

2. Проведение эксперимента

- 1. Уравнивается давление в колбе с давлением в атмосфере (третье положение крана). При этом оба столба воды на водоуказательном стекле должны показывать нулевой уровень.
- 2. Ручным насосом в колбу закачивается воздух (первое положение крана) до давления около 300...330 мм вод. ст. (по одной части водоуказательного стекла). Кран перекрывается (второе положение), тем самым сосуд изолируется по давлению от атмосферы. С увеличением давления воздуха в колбе происходит увеличение его температуры. В этом случае воздух из колбы отдает тепло в атмосферу через стенку сосуда. Естественно, что при этом снижается его давление. Снижение давления происходит до тех пор, пока не установится температурное равновесие с окружающей средой. Наступившее состояние и является состоянием 1.
- 3. Открывают на короткое время кран, соединяя колбу с выхлопным клапаном. Воздух с характерным шумом выходит из сосуда в атмосферу, при этом столбик воды на манометре быстро падает. Поскольку при этом происходит

адиабатное расширение воздуха в сосуде, его давление приближается к P_* , а температура снижается ниже атмосферной. Сразу же начинается теплообмен между воздухом в сосуде и окружающей средой. Чтобы сделать этот теплообмен незначительным и не нарушить условия адиабатного процесса, необходимо, как только шум начнет стихать и падение столба воды замедлится, закрыть кран. *Ни в коем случае нельзя затягивать адиабатный выхлоп воздуха!*

4. Немедленно, после закрытия крана, давление в сосуде (из-за нагревания воздуха от окружающей среды) начинает расти и спустя некоторое время устанавливается равным P_2 . Температура воздуха в сосуде при этом вос-

станавливается до *T*^{*}. Наступившее состояние является *состоянием* 3. Результаты наблюдений заносят в табл.1.

Таблица измерений			7	Габлица 1
Состояние	Единица	Э	кспериме	ЭНТ
	измерения	1	2	3
Начальное состояние 1	мм.вод.ст.	$P_1 =$	$P_1 =$	$P_1 =$

Конечное состояние 3 мм.вод	I.CT. $P_2 = P_2 = P_2 =$
-----------------------------	---------------------------

Внимание! Так как в лабораторной установке используется дифференциальный манометр, давление окружающей среды всегда будет $P_*=0$ мм.вод.ст.

3. Обработка результатов эксперимента

1. Показатель адиабаты вычисляют по формуле (так как $P_*=0$)

$$k = \frac{P_1}{P_1 - P_2},$$
 (10)

где давление P_1 , P_2 – измерено в мм.вод.ст.

2. Для повышения точности опыт повторяют несколько раз. Показатель адиабаты вычисляют по среднему значению:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^{n} k_i}{n}.$$
(11)

3. Используя справочное значение изобарной теплоемкости воздуха и учитывая, что в интервале температур 0...100 °С эта теплоемкость может считаться постоянной (≈1005 Дж/(кг⋅К), находят объемную теплоемкость воздуха *C*_V, Дж/(кг⋅К):

$$c_V = \frac{c_P}{k} \tag{11}$$

4. Используя формулу Майера, находят газовую постоянную для воздуха *R*, кДж/кг·К.

$$R_{\rm B} = c_P - c_V \,. \tag{12}$$

5. Используя универсальную газовую константу Менделеева μR =8314 Дж/кмоль К, находят молекулярную массу воздуха

$$\mu_{\rm B} = \frac{\mu R}{R_{\rm B}} \,. \tag{13}$$

6. Полученное значение $R_{\rm B}$ и $\mu_{\rm B}$ сравнивают со справочными ($R_{\rm B}$ =287,1 Дж/(кг·К); $\mu_{\rm B}$ =28,96).

Контрольные вопросы

- 1. Каким образом можно объяснить несовпадение экспериментальных результатов со справочными?
- 2. Чем будет отличаться *PV*-диаграмма эксперимента от теоретической, показанной на рис.1?
- 3. Почему в эксперименте можно не учитывать атмосферное давление?
- 4. Как можно объяснить физический смысл показателя адиабаты?
- 5. В чем заключается сущность отличия показателя адиабаты от показателя политропы?

Лабораторная работа №3

Исследование процесса теплоотдачи от горизонтального цилиндра к воздуху в условиях свободной конвекции

Конвекция – это один из способов передачи теплоты от более нагретых тел к менее нагретым. Различают свободную (естественную) конвекцию и вынужденную.

Свободная конвекция – это совокупность процессов, происходящих из-за воздействия подъемных сил, обусловленных разностью плотностей нагретых и холодных объемов. Следствием является перемещение объемов, что сопровождается теплообменом.

Теплообмен между стенкой и воздухом (в дальнейшем жидкостью, так как в рамках гидрогазодинамики различают жидкости «капельные» и «газообразные») обусловлен как конвекцией, так и теплопроводностью и в инженерной практике называется конвективной теплоотдачей.

Если температура стенки тела выше или ниже температуры жидкости, то прилегающий к телу объем жидкости прогревается или охлаждается и возникает его восходящее (нисходящее) движение.

Теплота, передаваемая при конвективной теплоотдаче, определяется в соответствие с законом Ньютона-Рихмана

$$Q_{\rm K} = \alpha (t_{\rm C} - t_{\rm K}) F , \qquad (1)$$

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

*t*_C – температура поверхности тела (в дальнейшем – стенки), °С;

 $t_{\mathcal{K}}$ – температура жидкости, °C;

F – площадь поверхности теплообмена, м².

Из (1) получим

$$\alpha = \frac{Q_{\rm K}}{(t_{\rm T} - t_{\rm W})F}$$
⁽²⁾

Коэффициент теплоотдачи α численно равен теплоте, отданной в единицу времени с единичной поверхности тела при нагреве жидкости, омывающей поверхность на один Кельвин.

Следует отметить, что при практическом применении формулы (1) наибольшую сложность представляет определение коэффициента теплоотдачи α , который чаще всего определяют на основе экспериментальных данных. Это стало возможным с применением методов теории подобия. Согласно этой теории обработка результатов эксперимента ведется не по каждому влияющему фактору, имеющему размерность (физические свойства исследуемых веществ, их кинематические или динамические характеристики, конструктивные особенности установки, ее линейные размеры, площади поверхности теплообмена, фундаментальные константы и т.п.), а по их совокупности, представленной в виде безразмерных комплексов. Влияющие факторы, объединенные в такие комплексы, называют *критериями подобия*. При проведении экспериментов и исследовании каких-либо физических явлений устанавливают взаимозависимости между критериями подобия. Эти зависимости справедливы не только для исследуемого объекта, но и для всех физически подобных явлений. В частности, в настоящей лабораторной работе – для процессов естественной конвекции при теплоотдаче от горизонтальных цилиндров.

Используя методы теории подобия, следует помнить, что расчетные значения критериев подобия не должны выходить за пределы, в которых была определена формула взаимосвязи.

Зависимость между критериями подобия при свободной конвекции имеет вид

$$Nu = C \cdot (Gr \, Pr)^n \tag{3}$$

где *С* и *n* – постоянные, определяемые по экспериментальным данным.

Критерий подобия Нуссельта (часто называемый безразмерным коэффициентом теплоотдачи), характеризующий интенсивность процесса конвективной теплоотдачи

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} \tag{4}$$

Здесь λ , Вт/(м·К) – коэффициент теплопроводности жидкости, омывающей поверхность;

d, м – характерный (определяющий) размер.

За характерный размер обычно принимают тот из линейных размеров, который оказывает наибольшее влияние на характер обтекания тела жидкостью. Для цилиндра – это диаметр.

Критерий Грасгофа определяется как

$$Gr = g\beta\Delta t \frac{d^3}{v^2}$$
⁽⁵⁾

и характеризует взаимодействие подъемных сил и сил вязкости и описывает гидродинамику движения жидкости при свободной конвекции.

Здесь
$$\beta$$
, 1/К – коэффициент объемного расширения $\beta = \frac{1}{T} = \frac{1}{t_{\mathcal{K}} + 273}$;
g, м/c² – ускорение свободного падения;

v, м²/с – коэффициент кинематической вязкости жидкости (определяется по справочным данным).

Число Прандтля

$$Pr = \frac{V}{a} \tag{6}$$

и характеризует физические свойства жидкости. Здесь $a = \lambda/c_P \rho$ – коэффициент температуропроводности, м²/с.

При теплоотдаче между поверхностью какого-либо тела и воздухом число Прандтля можно принять равным 0,7. В этом случае уравнение (3) примет более простой вид

$$Nu = C \cdot Gr^n. \tag{7}$$

Определение зависимости (7) для конвективной теплоотдачи к воздуху является основной задачей данной лабораторной работы.

Следует отметить, что числа *Nu* и *Gr* содержат ряд величин (v, λ, β), которые зависят от *определяющей температуры*. Для свободной конвекции в качестве определяющей температуры обычно принимается температура среды (жидкости).

Константы *С* и *n* зависят от характера течения жидкости, определяются критерием Грасгофа и приведены в табл.1.

	Коэффициенты С и <i>п</i>		Таблица 1
Интервал	Gr	С	п
1	10 ⁻³ …5⋅10 ²	1,130	0,125
2	$5.10^22.10^7$	0,494	0,250
3	>2·10 ⁷	0,120	0,333

Цель работы

Изучение закономерности теплоотдачи при свободной конвекции на примере теплоотдачи от горизонтального цилиндра к воздуху.



Рис.1. Принципиальная схема экспериментальной установки по определнию коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции:

1...6 – термопары; 7 – цилиндр; 8 – изолятор; 9 – тепловыделяющий элемент (электронагреватель); 10 – потенциометр; 11 – переключатель; 12 – амперметр; 13 – вольтметр; 14 – лабораторный автотрансформатор (ЛАТР); 15 – сигнальная лампа; 16 – выключатель

Практическое освоение методов исследования теплообмена с применением теории подобия.

Экспериментальное определение коэффициента теплоотдачи на основе закона Ньютона-Рихмана и с применением теории подобия. Сравнение полученных результатов.

Методика выполнения работы

1. Схема лабораторной установки

Принципиальная схема установки для исследования теплоотдачи при свободной конвекции показана на рис.1.

Установка имеет два идентичных алюминиевых экспериментальных цилиндра 7, с различными диаметрами. Внутри каждого цилиндра установлен тепловыделяющий элемент (электронагреватель) 9, на который подается напряжение через лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) 14. Режим нагрузки контролируется амперметром 12 и вольтметром 13. Чтобы тепло отдавалось только образующей поверхностью цилиндра, по торцам установлены теплоизоляторы 8.

На рабочем участке цилиндра *l*_p установлены хромель-копелевые термопары *1...6*. Термопары через переключатель *11* подключены к потенциометру *10*, сферическая шкала которого проградуирована в °С.

Установка имеет общий выключатель 16 и индикатор состояния 15.

Рабочий участок *l*_p, на котором производятся измерения, меньше полной длины цилиндра *l*. Это необходимо при проведении эксперимента для снижения погрешности от аксиальных стоков тепла.

2. Графическое обобщение экспериментальных данных

Зависимость $Nu = C \cdot Gr^n$ строится в логарифмических координатах

$$lg Nu = lg C + n lg Gr$$
(8)

На рис.2 эта зависимость представлена в виде графика, при построении которого следует соблюдать один масштаб по обеим осям.





3. Проведение эксперимента

Включаются нагреватели двух горизонтальных цилиндров, и с помощью ЛАТРов устанавливается режим нагрева. Для ускорения выхода на режим лучше начинать с установления более высокой нагрузки на электронагревателе, постепенно снижая ее до требуемой в эксперименте. Измерения выполняются после наступления стационарного режима (режим, при котором с течением времени температура тела не меняется).

При стационарном режиме проводятся измерения температур на поверхности цилиндра, температуры среды, а также потребляемой мощности. Экспериментальные данные заносятся в табл.2.

Режимы задаются преподавателем.

	Таблица измерений Таблица 2												
Цилиндр	WI	Т <i>Т_{Сі},</i>	Температуры поверхности <i>T</i> _{C<i>i</i>} , °С, где <i>i</i> =1, 2, 3, 4, 5, 6 – но- мера термопар					ока I, A	ние U, B	индра d , м	индра <i>I</i> , м	го участка <i>l</i> _p , м	
	Letter 1		№ термопары			емпература	Сила то	Напряже]иаметр ци	Длина цил	на рабочег		
		1	2	3	4	5	6	Те			4		Ъл
т	Режим 1												
1	Режим 2												
п	Режим 1												
11	Режим 2												

Принять степень черноты поверхности цилиндров для гладкой окисленной поверхности алюминия $\epsilon = 0,2$.

4. Расчеты коэффициентов теплоотдачи и чисел подобия при свободной конвекции

На основании измеренной температуры среды определяются ее физические параметры, табл.3. Расчетные данные сводятся в табл. 5. Затем по экспериментальным точкам строится график lgNu=f(lgGr).

По графической зависимости определяются коэффициенты *С* и *n*. Проводится сравнение полученных коэффициентов с известными (табл.1).

	им рт.ст.	Таблица З			
<i>t</i> ₀, °C	р, кг/м ³	<i>с</i> _р , Дж/кг⋅К	λ·10 ² , Вт/м·К	v·10 ⁶ , м²/с	Pr
0	1,293	1005	2,44	13,28	0,707
5	1,269	1005	2,47	13,72	0,706
10	1,247	1005	2,51	14,16	0,705
15	1,226	1005	2,56	14,61	0,704
20	1,205	1006	2,60	15,06	0,703
25	1,180	1006	2,64	15,53	0,702
30	1,165	1006	2,68	16,00	0,701
35	1,147	1006	2,72	16,48	0,700
40	1,128	1007	2,76	16,96	0,699
45	1,111	1007	2,79	17,51	0,699
50	1,093	1007	2,83	17,95	0,698
55	1,078	1007	2,87	18,45	0,697
60	1,060	1007	2,90	18,97	0,696

Таблица расчетов						4	
№ Наименование		Размерность	Формула или источник		индр 2,14 м	Цилиндр ∅ 80 мм	
	величины			Pe>	ким	Режим	
				1 2		1	2
1	Средняя тем- пература по- верхности ци- линдра	°C	$t_{\rm C} = \sum_{i}^{6} \frac{t_{\rm Ci}}{6}$				
2	Полный теп- ловой поток	Вт	$Q = IU\cos\phi$, $\cos\phi = 0.96$				
3	Тепловой по- ток с рабочего участка ци- линдра	Вт	$Q_{\rm p} = Q \frac{l_{\rm p}}{l}$				
4	Поверхность рабочего уча- стка цилиндра	M ²	$F = \pi dl_{\rm p}$				
5	Лучистый по- ток с рабочей поверхности	Вт	$Q_{\rm JI} = 5.7F\varepsilon \left(\frac{T_{\rm T}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\rm K}}{100}\right)^4$				
6	Конвективный поток с рабо- чей поверхно- сти	Вт	$Q_{\rm K} = Q_{\rm p} - Q_{\rm J}$				
7	Коэффициент теплоотдачи	$\frac{BT}{M^2K}$	$\alpha = \frac{Q_{\rm K}}{\alpha (t_{\rm C} - t_{\rm W})F}$				
8	Коэффициент теплопровод- ности воздуха	<u>Вт</u> мК	λ (см. табл.3, при темпера- туре среды <i>t</i> _ж)				
9	Критерий Нус- сельта		$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$				
10	Коэффициент объемного расширения	1/К	$\beta = \frac{1}{t_{\mathcal{K}} + 273}$				
11	Разность тем- ператур по- верхности ци- линдра и сре- ды	°C	$\Delta t = (t_{\rm C} - t_{\rm W})$				
12	Коэффициент кинематиче- ской вязкости	m ² /c	v (см. табл.3, при темпера- туре среды <i>t</i> _ж)				
13	Критерий Грас- гофа		$Gr = \beta g \Delta t \frac{d^3}{v^2}$				

14	Логарифм кри- терия Нус- сельта		lgNu		
15	Логарифм кри- терия Грасго- фа		lgGr		
16	Расчетное значение чис- ла Нуссельта		$Nu_{p} = C \cdot Gr^{n}$, (C и n) – по табл.1 либо по графику lgNu = f(lgGr) – по заданию преподавателя		
17	Расчетное значение ко- эффициента теплоотдачи	$\frac{BT}{M^2K}$	$\alpha_{\rm p} = \frac{Nu_{\rm p}\lambda}{d}$		
18	Относительная погрешность		$\delta = \frac{\alpha - \alpha_{\rm p}}{\alpha_{\rm p}} 100\%$		

Контрольные вопросы

- 1. Объясните, под воздействием каких сил возникает свободное движение жидкости.
- 2. Изложите механизм теплообмена при свободной конвекции.
- 3. Запишите формулу для расчета теплового потока при конвективной теплоотдаче.
- 4. Укажите размерность и физический смысл коэффициента теплоотдачи.
- 5. Каков общий вид критериального уравнения для определения коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции?
- 6. Почему в формуле $Nu = C \cdot Gr^n$ величины *C* и *n* имеют различные значения для разных интервалов значений числа *Gr*?
- 7. Объясните методику определения коэффициента теплоотдачи при расчете конвективного обмена.
- 8. Как определяется конвективный тепловой поток в эксперименте?
- 9. Чем объясняется наличие (отсутствие) относительной погрешности при определении в лабораторной работе α разными способами?

Лабораторная работа №4

Определение коэффициента теплопроводности методом цилиндрического слоя

Теплопроводность – это один из способов передачи теплоты от более нагретых элементов тела к менее нагретым. В газах теплопроводность осуществляется путем диффузии молекул и атомов; в жидкостях и твердых диэлектриках – за счет упругих волн; в металлах – в основном путем диффузии свободных электронов, а роль упругих колебаний кристаллической решетки имеет второстепенное значение.

Опыт показывает, что для любого тела процесс переноса тепла полностью зависит от распределения температуры в теле. Совокупность значений температур во всех точках тела в данный момент определяется уравнением температурного поля

$$t = f(x, y, z, \tau) \tag{1}$$

где *х*, *у*, *z* – координаты произвольной точки тела; т - текущее время.

В случае стационарного (установившегося) режима (скорость изменения

температуры $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$) и одномерного температурного поля $\frac{\partial t}{\partial y} = \frac{\partial t}{\partial z} = 0$ уравнение (1) принимает более простой вид

$$t = f(x) \tag{2}$$

Возрастание температуры характеризуется градиентом температуры, который представляет собой вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры и численно равен производной от температуры по этому направлению

$$gradt = \lim_{\Delta n \to 0} \left(\frac{\Delta t}{\Delta n} \right) = \frac{\partial t}{\partial n}$$
(3)

 \sim

Распространение тепла теплопроводностью подчиняется закону Фурье:

$$\vec{q} = -\lambda gradt$$
 или $q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n}$, (4)

где λ - коэффициент теплопроводности.

Абсолютная величина вектора *q* называется плотностью теплового потока, или удельным тепловым потоком и с учетом падения температуры в среде

$$q = \frac{Q}{F} = \lambda \frac{\Delta t}{\Delta n}, \qquad (5)$$

$$\lambda = \frac{Q}{F \frac{\Delta t}{\Delta n}}$$
(6)

Следовательно, физический смысл коэффициента теплопроводности характеризует теплота, переданная через 1 м² поверхности в единицу времени при снижении температуры на 1 К на длине в 1 м. Другими словами коэффициент теплопроводности λ является физическим свойством веществ и материалов и характеризует их способность проводить тепло.

Для различных материалов коэффициенты теплопроводности различены, для каждого из них λ зависит от структуры, плотности, влажности, температуры и т.д. Например, для металлов λ=10...400 Вт/(м·К); для капельных жидкостей – 0,07…0,7; для газов – 0,006…0,6. Материал, для которого λ≤0,25



Рис.1. Схема цилиндрического слоя

Вт/(м·К), называют теплоизоляционным.

В настоящей лабораторной работе коэффициент теплопроводности определяется методом цилиндрического слоя в стационарном режиме. Для этого исследуемый материал в форме цилиндрического слоя помещается между металлическими, коаксиально расположенными трубами. Внутренняя цилиндрическая поверхность равномерно обогревается электрическим обогревателем. В установившемся режиме вся теплота О проходит через цилиндрический слой материала.

Если продифференцировать уравнение стационарной теплопроводности через

цилиндрический слой di при условиях первого рода

 $t(r)_{r=r_1} = t_{\text{BH}}$ и $t(r)_{r=r_2} = t_{\text{H}}$, рис.1), а также пренебречь отводом тепла с торцов трубы и принять трубу неограниченной по длине, получаем для цилиндрического слоя:

граничных

$$Q = \frac{2\pi\lambda l(t_{\rm BH} - t_{\rm H})}{ln\frac{d_2}{d_1}}$$
(7)

*d*₁ и *d*₂, м – соответственно внутренний и наружный диаметры цилиндригде ческого слоя (рис. 1);

l, м – длина цилиндра;

*t*_{BH} и *t*_H – средние температуры внутренней и наружной поверхностей.

Цель работы

Закрепление теоретических знаний по теплопередаче при изучении процесса теплопроводности на примере определения коэффициента теплопроводности различных материалов.

Практическое освоение метода цилиндрического слоя при определении коэффициента теплопроводности.

Проведение эксперимента и сопоставление полученных результатов со справочными данными.

Методика выполнения работы

1. Схема лабораторной установки

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2. Исследуемый слой материала 17 помещен между двумя коаксиальными металлическими трубами. Внутри трубы установлен электрический нагреватель 9, создающий равномерный тепловой поток. Мощность, потребляемая нагревателем, регули-





1...6 – термопары; 7 – цилиндры; 8 – изоляторы; 9 – тепловыделяющий элемент (электронагреватель); 10 – переключатель; 11 – потенциометр; 12 – амперметр; 13 – автотрансформатор лабораторный (ЛАТР); 14 – сигнальная лампа; 15 – выключатель; 16 – вольтметр; 17 – исследуемый материал руется лабораторным автотрансформатором (ЛАТРом) 13 и определяется по результатам измерения тока амперметром 12 и напряжения вольтметром 16.

Температуры на внутренней и наружной поверхностях исследуемого материала измеряются термопарами 1...6. Учитывая, что в лабораторной работе определяется коэффициент теплопроводности трех различных материалов переключатель 10 имеет 18 позиций (по числу термопар – на каждом слое по шесть). Температуры определяются посредством потенциометра, сферическая шкала которого проградуирована в °С.

2. Проведение эксперимента и обработка результатов опыта

После предварительного изучения литературы и ознакомления с устройством лабораторной установки необходимо установить заданный преподавателем режим нагрева и приступить к проведению опыта. После наступления стационарного (*t*=*const*) режима показания всех термопар заносят в таблицу измерений (табл.1). Кроме того, в таблицу измерений заносят показания вольтметра и амперметров.

	Табл	1ица измерений					Табл	ица 1
Материал слоя, № опы- та	Сила тока, <i>I</i> , А	Напряжение, <i>U</i> , B	Температуры					
			Вну ⁻ верхн	гренняя ность, <i>t</i>	я по- _{вн} , °С	Нар верх	оужная ность, <i>і</i>	по- _{fн} , °C
Цемент –					термо	пары		
30%; Al ₂ O ₃ - 70%			1	2	3	4	5	6
(λ_1)								
Опып №20 Шцуровой ас-					термо			
			7	8		пары 10	11	12
Опыт №1			'	0		10		12
Опыт №2								
Опыт №3								
Шлаковата					термо	пары	1	
(λ ₃)			13	14	15	16	17	18
Опыт №1								
Опыт №2								
Опыт №3								

На основании измеренных значений проводят расчеты, результаты которых заносят в табл.2.

Коэффициент теплопроводности испытуемого материала вычисляется по формуле, полученной из (7), а теплота *Q* определяется по электрической мощности, потребляемой нагревателем.

Средние температуры *t*_{BH} и *t*_H определяют по показаниям термопар 1...3, 7...9, 13...15 и 4...6, 10...12, 16...18 соответственно.

Полученное значение коэффициента теплопроводности следует отнести к средней температуре материала.

Относительная погрешность расчета коэффициента теплопроводности материала методом цилиндрического слоя определяется как среднеквадратичная величина из соотношения

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \pm \left[\left(\frac{\Delta Q}{Q} \right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l} \right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t_\lambda} \right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d_{\rm CP}} \right)^2 \right]^{0.5}, \tag{8}$$

где $\Delta\lambda$, ΔQ , Δl , Δt , Δd – абсолютные погрешности измерения отдельных величин. В лабораторной работе допустимо принять ΔQ =0,5 Вт, Δl =0,25 мм, Δd =0,5 мм, Δt =0,5 °C.

На основании проведенных расчетов делают вывод о возможности использования исследуемых материалов.

	-		1401	iuqa z		
Наименование	Формула		Вещество			
Паименование	Формула	Газмерноств	λ_1	λ2	λ_3	
Тепловой по- ток	$Q = IU \cos \varphi$, $\cos \varphi = 0.96$	Вт				
Средняя тем- пература внут- ренней по- верхности слоя	$t_{\rm BH} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3}$	°C				
Средняя тем- пература на- ружной по- верхности слоя	$t_{\rm H} = \frac{t_4 + t_5 + t_6}{3}$	°C				
Коэффициент теплопровод- ности	$\lambda = \frac{Q \cdot ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi l (t_{\rm BH} - t_{\rm H})}$	Вт/(м⋅К)				
Средняя тем- пература слоя	$t_{\lambda} = \frac{t_{\rm BH} + t_{\rm H}}{2}$	°C				

Таблица расчетов

Таблица 2

Относительная погрешность измерения	$\delta\lambda = \begin{bmatrix} \left(\frac{\Delta Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \\ + \left(\frac{\Delta t}{t_{\lambda}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d_{\rm CP}}\right)^2 \end{bmatrix}^{0.5}$	От.ед.		
Абсолютная погрешность	$\Delta\lambda = \delta\lambda \cdot \lambda$	Вт/(м⋅К)		
Коэффициент				
теплопровод-	$\lambda _{t_{\lambda}} = \lambda \pm \Delta \lambda$	Вт/(м⋅К)		
ности	۱.۷			

Контрольные вопросы

- 1. Что представляет собой процесс теплопроводности по своей физической природе?
- 2. Чем объясняется знак «минус» в законе Фурье?
- 3. В чем заключается содержание основного закона теплопроводности? Дать определение коэффициента теплопроводности и указать его размерность.
- 4. Что означает понятие «время» в рамках рассмотрения физического смысла коэффициента теплопроводности?
- Привести в качестве примера численные значения коэффициента теплопроводности газа, жидкости и твердого тела (изоляционного материала и металла).
- 6. Сравнить закон Фурье с законом Ома для участка электрической цепи.
- 7. Каким образом изменится коэффициент теплопроводности исследуемых материалов при увеличении температуры нагрева и что это может означать с точки зрения их практического применения?

Лабораторная работа №5

Определение степени черноты поверхности методом двух эталонов

С расчетом лучистого теплообмена встречаются в самых различных областях науки и техники, в частности в теплотехнике, ядерной энергетике, ракетной технике, металлургии и др.

Лучистый теплообмен это один из способов передачи теплоты между телами с различной температурой, обусловленный процессами испускания, отражения, поглощения и пропускания лучистой энергии, переносимой электромагнитными волнами. В отличие от переноса тепла теплопроводностью и конвективного теплообмена лучистый теплообмен между телами может происходить и при отсутствии промежуточной среды (в вакууме).

Интегральное излучение абсолютно черного тела определяется законом Стефана-Больцмана, Вт/м²:

$$E_0 = C_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4,$$
 (1)

где $C_0 \approx 5.7$, Вт/(м²·K⁴) – коэффициент излучения абсолютно черного тела; *T*, К – температура.

В большинстве случаев твердые и жидкие тела непрозрачны для теплового излучения (видимое, инфракрасное) и поглощение ими лучистой энергии происходит в тонком поверхностном слое.

Обычно при расчетах лучистого теплообмена предполагается, что тела являются серыми. Их излучательная способность

$$E = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4 \tag{2}$$

Из (1) и (2) следует, что степень черноты поверхности тела

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} < 1 \tag{3}$$

и определяет долю излучения серого тела от излучения абсолютно черного тела при одинаковой температуре. Максимальное значение ε=0,95 имеют фетр и нефтяная сажа, а минимальное (0,1...0,15) – полированные металлы.

Степень черноты ϵ является важнейшей характеристикой лучистого теплообмена. Например, лучистый теплообмен между двумя параллельными телами рассчитывается по формуле, Bt/m^2

$$q_{\rm JI} = \varepsilon_{\rm np} \cdot C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \tag{4}$$

где приведенная степень черноты

$$\varepsilon_{\rm np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}.$$
(5)

Соотношение (4) лежит в основе методов прямого определения степени черноты поверхности образца.

Цель работы

Закрепление теоретических знаний при изучении особенностей лучистого теплообмена. Практическое освоение метода исследования теплообмена.

Экспериментальное и графическое (на основе эксперимента) определение степени черноты серого тела на основе метода двух эталонов. Сопоставление полученных результатов.

Методика выполнения работы

1. Описание лабораторной установки

Установка, рис.1. состоит из трех цилиндров 4. Поверхность каждого цилиндра обработана специальным образом. Поверхность одного из цилиндров – никелирована и полирована, степень черноты поверхности известна (ε=0,15) и этот цилиндр является белым телом или эталоном №1. Поверхность другого цилиндра покрыта сажей мазута, степень черноты поверхности известна (ε=0,95) и этот цилиндр является черным телом или эталоном №2. Поверхность третьего цилиндра покрыта окисью меди. Данный цилиндр является серым телом (образцом), степень черноты его поверхности неизвестна. При проведении лабораторной работы необходимо определить степень черноты образца.

Внутри каждого цилиндра установлен тепловыделяющий элемент (электронагреватель) на который подается напряжение. Для снижения тепловых потерь на торцах цилиндров установлены термоизоляторы 2. Температура на поверхности цилиндров регулируется изменением мощности на нагревательном



Рис.2. Схема лабораторной установки по определению степени черноты методом двух эталонов:

1 – термопара; 2 – изолятор; 3 – тепловыделяющий элемент (электронагреватель); 4 – цилиндр; 5 – вольтметр; 6 – автотрансформатор лабораторный (ЛАТР); 7 – потенциометр; 8 – амперметр элементе при помощи лабораторных автотрансформаторов (ЛАТРов) 6. Контроль температуры осуществляют посредством термопар 1 и потенциометров 7, контроль мощности тепловыделяющего элемента – соответствующими вольтметрами 5 и амперметрами 8.

2. Методика определения степени черноты поверхности образца методом двух эталонов

Если цилиндрический образец нагревать, то вместе с лучистым будет происходить и конвективный теплообмен между поверхностью цилиндра и средой

$$Q_{\rm K} = \alpha F (t_{\rm C} - t_{\rm W}), \tag{6}$$

где $t_{\rm C}$ и $t_{\rm W}$ – температуры поверхности и среды; F – поверхность цилиндра; α – коэффициент теплоотдачи.

Кроме того, существуют потери тепла от теплопроводности Q_{λ} . Таким образом, результирующий тепловой поток

$$Q_{\text{obp}} = Q_{\text{JI}} + Q_{\text{K}} + Q_{\text{T}}.$$
(7)

С учетом подстановки

$$Q_{\rm obp} = \varepsilon_{\rm obp} C_0 F \left[\left(\frac{T_{\rm C}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\rm W}}{100} \right)^4 \right] + \alpha F \left(t_{\rm C} - t_{\rm W} \right) + Q_{\rm T}$$
(8)

Поскольку точно определить составляющие $Q_{\rm K}$ и $Q_{\rm T}$ невозможно, их исключают приданием двум эталонам одинаковой формы и размеров. При этом степень черноты эталонов ε_{91} и ε_{92} известны. Если предположить, что мощность тепловыделения равна электрической мощности на тепловыделяющем элементе Q=W и уравнять температуры на поверхностях цилиндров $t_{\rm C}$ (путем изменения электрической мощности нагрева $W_{\rm ofp}$, $W_{\rm 91}$, $W_{\rm 92}$), то выражение (8) для образца и двух эталонов примет вид

$$W_{\Im 2} - W_{\text{o}\delta p} = Q_{\Im 2} - Q_{\text{o}\delta p} = C_0 F \left[\left(\frac{T_{\text{C}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{K}}}{100} \right)^4 \right] \left(\varepsilon_{\Im 2} - \varepsilon_{\text{o}\delta p} \right);$$
$$W_{\text{o}\delta p} - W_{\Im 1} = Q_{\text{o}\delta p} - Q_{\Im 1} = C_0 F \left[\left(\frac{T_{\text{C}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{K}}}{100} \right)^4 \right] \left(\varepsilon_{\text{o}\delta p} - \varepsilon_{\Im 1} \right).$$
(9)

Разделив первое выражение на второе, получим

$$\frac{W_{\Im 2} - W_{\text{ofp}}}{W_{\text{ofp}} - W_{\Im 1}} = \frac{Q_{\Im 2} - Q_{\text{ofp}}}{Q_{\text{ofp}} - Q_{\Im 1}} = \frac{\varepsilon_{\Im 2} - \varepsilon_{\text{ofp}}}{\varepsilon_{\text{ofp}} - \varepsilon_{\Im 1}} = C,$$
(10)

откуда

$$\varepsilon_{\text{obp}} = \frac{\varepsilon_{\exists 2} + \varepsilon_{\exists 1} \cdot C}{1 + C}, \qquad (11)$$

где *С* определяется по результатам измерения W_{odp} , $W_{\exists 1}$ и $W_{\exists 2}$.

3. Графический способ определения степени черноты

В лабораторной работе степень черноты $\varepsilon_{oбp}$ необходимо так же определить графически. Действительно, при одинаковой температуре поверхности $T_{\rm T}$ цилиндрических тел величина

$$C_0 F\left[\left(\frac{T_{\rm C}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\rm W}}{100}\right)^4\right] = B$$
(12)

и суммы $Q_{\rm K}+Q_{\rm T}=A$ для образца и эталонов будут одинаковыми. Тогда результирующий поток для любого из трех тел

$$Q = W = A + B\varepsilon \quad (13)$$

Для построения линейной зависимости (13) достаточно иметь два этало-



Рис.2. Графическое определение степени черноты серого тела и лучистого теплового потока

з) достаточно иметь два эталона с известными ε_{31} и $\varepsilon_{32.}$ В настоящей лабораторной работе $\varepsilon_{31}=0,15, \varepsilon_{32}=0,95.$

Задав эталонам и образцу одинаковый тепловой стационарный режим

 $\frac{\partial t_{\rm C}}{\partial \tau} = 0$, $t_{\rm ofp} = t_{\Im 1} = t_{\Im 2}$), для измеренных мощностей $W_{\Im 1}$ и $W_{\Im 2}$ наносим точки на координатную сетку ε —W. Соединим прямой линией эти точки с известными $\varepsilon_{\Im 1}$ и $\varepsilon_{\Im 2}$. Затем по известной мощности $W_{\rm ofp}$ в образце находим по графику неизвестную $\varepsilon_{\rm ofp}$. Из графика (рис.2) находим как лучистую составляющую теплового потока $Q_{\rm II}$, так и сумму $Q_{\rm K}+Q_{\rm T}$. Для этого необходимо продолжить прямую до пересечения с осью абсцисс и получить точку «К», для которой ε =0. Следовательно, отрезок от начала координат до точки «К» определяет $Q_{\rm K}+Q_{\rm T}$. Лучистая же составляющая потока $Q_{\rm II} = W - (Q_{\rm K}+Q_{\rm T})$ равна отрезку «К-М», рис.2.

4. Проведение эксперимента

Процесс уравнивания температур необходимо проводить только после наступления стационарного режима. Поскольку из трех цилиндров наибольшую термическую инерцию имеет тело с наименьшей степенью черноты (ε_{Э1}), то методически необходимо уравнивать температуры тел, изменяя мощность через образец и эталон №2, для которых степень черноты больше чем ε_{Э1}. Соответствующие рассеиваемые мощности определяются по результатам измерения тока и напряжения:

$$Q = W = IU\cos\phi \tag{14}$$

где *cos*φ = 0,96.

Результаты измерений заносятся в таблицу измерений (табл. 1).

Следует помнить, что степень черноты образца зависит не только от состояния поверхности, но и от ее температуры.

	Таблица 1				
Наименование объекта	И	змеряемые	Полный тепловой		
	<i>t</i> _T , °℃	<i>I</i> , A	<i>U</i> , B	ε	поток <i>W</i> , Вт
Образец					$Q_{\rm o ar o p} = W_{\rm o ar o p} =$
Эталон 2				0,15	$Q_{\Im 2} = W_{\Im 2} =$
Эталон 1				0,95	$Q_{\exists 1} = W_{\exists 1} =$

Таблица результатов расчетов

Таблица 2

-	таблица резул		pac icrob		Tuonuqu 2		
		Лучи	стая состав-	Суммарное значение конве			
Степень черн	оты образца	ляющая теплового		тивного потока и потока теп			
из графика	расчетное	ПОТОКА Г	а образца (по рафику)	лопроводн (по	юсти для образца о графику)		
ε _{ΓΡ} =	= ₉ 3	<i>Q</i> л=	, Вт	$(Q_{\rm K}+Q_{\rm T})=$, Вт		

По данным табл.1 строится зависимость $\varepsilon = f(W)$, как показано на рис.2. По графику определяются степень черноты образца ε_{o6p} , лучистая составляющая теплового потока Q_{Π} , а также суммарное значение конвективного потока и теплопроводности ($Q_{\rm K}+Q_{\rm T}$). Данные, полученные по графику, а также расчетное значение степени черноты по (11) заносятся в табл.2.

Определяется относительная погрешность определения степени черноты разными методами

$$\delta \varepsilon = \frac{\varepsilon_{\rm P} - \varepsilon_{\Gamma \rm P}}{\varepsilon_{\rm P}} 100 \tag{15}$$

Контрольные вопросы

- 1. Что такое степень черноты поверхности тела?
- 2. Для чего нужно знать степень черноты поверхности?
- 3. От каких факторов зависит степень черноты поверхности?
- 4. В каких пределах может меняться степень черноты для различных тел?
- 5. Объясните сущность метода определения степени черноты образца методом двух эталонов.
- 6. Для чего нужно при реализации эксперимента иметь цилиндры с одинаковыми геометрическими размерами?
- 7. Почему температуры образца и эталонов должны быть одинаковыми?
- 8. Почему тепловые режимы образца и эталонов должны быть стационарными?
- 9. Чем объясняется наличие (отсутствие) относительной погрешности при определении степени черноты разными методами?

Лабораторная работа №6

Исследование процесса теплоотдачи при вынужденной конвекции

Под вынужденной конвекцией (в отличие от естественной) понимают такую совокупность процессов, сопровождающуюся теплообменом, при которой перемещение объемов жидкости происходит за счет внешних сил.

Теплота, отдаваемая при конвективном теплообмене, рассчитывается по формуле Ньютона-Рихмана

$$Q = \alpha F(t_{\rm C} - t_{\rm W})$$
⁽¹⁾

где α, Вт/м²·К – коэффициент теплоотдачи;

*t*_C, °C – температура тела (стенки трубы);

*t*_ж, °С – температура потока жидкости;

 $F, \, M^2 - поверхность теплоотдачи;$

Из (1) следует, что коэффициент теплоотдачи — это плотность теплового потока при Δt =1 К

$$\alpha = \frac{Q}{F(t_{\rm C} - t_{\rm W})}$$
(2)

Величина коэффициента теплоотдачи α зависит от многих факторов – формы и размеров поверхности теплоотдачи, режима течения жидкости, ее физических параметров и др.

Цель настоящей работы экспериментально определить коэффициент теплоотдачи α при продольном внутреннем обтекании трубы воздухом и обработать результаты опытов в критериальной форме, что позволит распространить их на физически подобные явления.

Теплота, воспринятая воздухом, рассчитывается по формуле

$$Q = Gc_p \left(t_{\text{BMX}} - t_{\text{BX}} \right), \tag{3}$$

где *G*, кг/с – массовый расход воздуха через сечение трубы;

*с*_{*p*}, Дж/(кг·К) – средняя массовая теплоемкость;

*t*_{вых}, °С – температура воздуха на выходе из трубы;

*t*_{вх}, °С – температура на входе в трубу.

Поверхность теплообмена

$$F = \pi d_{\rm BH} l_{,} \tag{4}$$

где *d*_{вн}, м – внутренний диаметр трубы;

l, м – длина обогреваемой части трубы.

В связи с тем, что при продольном обтекании температура воздушного потока меняется по длине трубы, то разность температур ($t_{C}-t_{\mathcal{K}}$), входящая в выражение (2), будет переменной. Поэтому в расчет вводят среднюю логариф-мическую разность температур

$$t_{\rm C} - t_{\rm K} = \Delta t = \frac{t_{\rm Bbix} - t_{\rm Bx}}{ln \frac{t_{\rm C} - t_{\rm Bx}}{t_{\rm C} - t_{\rm Bbix}}}.$$
(5)

Цель работы

Изучение закономерности теплоотдачи при вынужденной конвекции на примере теплоотдачи от стенки трубы движущемуся внутри нее воздуху.

Практическое освоение методов исследования теплообмена с применением теории подобия.

Экспериментальное определение коэффициента теплоотдачи при продольном обтекании трубы и обработка результатов опытов в критериальной форме.

Методика выполнения работы

1. Описание лабораторной установки

Схема установки показана на рис.1. Установка имеет латунную тонкостенную трубу 1, внутри которой движется воздух. Движение воздуха обеспечи-



Рис.1. Схема лабораторной установки: 1 – труба; 2 – трубка для измерения полного напора; 3 – патрубок статического давления; 4 – резервуар с водой; 5 – отверстие для выхода выпара; 6 – дифференциальный манометр для измерения динамичекого напора (тягоуровнемер); 7 – дифференциальный манометр для измерения статического давления (тягоуровнемер); 8 – фланец; 9 – барометр; 10 – конфузор; 11 – сосуд Дьюара с тающим льдом; 12 – термометр; 13 – вентилятор; 14 – выключатель; 15 – тепловыделяющий элемент (электронагреватель); 16 – изоляция; 17 – потенциометр; 18 – термопара

вает вентилятор 13. Количество воздуха, а следовательно, и скорость в трубе, регулируется числом оборотов вентилятора. Труба 1 погружена в резервуар 4 с кипящей водой. Нагрев воды производят электронагревателем 15.

Кипящая вода при атмосферном давлении имеет постоянную температуру (100 °С). Это обеспечивает постоянство температуры теплоотдающей поверхности трубы $t_C \approx 99,5$ °С. На выходном конце трубы расположены патрубок отбора для измерения статического давления 3 и трубка полного напора 2 с координатником, позволяющим перемещать и фиксировать трубку вдоль диаметра трубы 1. К трубке полного напора 2 и патрубку 3 подсоединен дифференциальный манометр 6, который измеряет динамический напор $h_{\rm д}$. По динамическому напору определяют скорость потока $\omega_{\rm cp}$, а по известному сечению трубы f и скорости потока – объемный расход воздуха V. В выходном измерительном сечении также расположена термопара 18, подключенная к потенциометру 17, а на входе воздушного потока расположен термометр 12, предназначенные для измерения температуры потока на выходе ($t_{\rm вых}$) и на входе ($t_{\rm вх}$) в трубу соответственно.

Манометром 7 измеряют избыточное статическое давление в выходном сечении, что совместно с показаниями барометра 9 позволяет находить абсолютное давление воздуха в выходном сечении. Зная это давление, можно вычислить плотность воздуха в выходном сечении, необходимую для расчета его массового расхода *G*.

2. Методический подход

Чтобы результаты опыта могли быть распространены на все подобные в тепловом отношении случаи, их необходимо обработать в критериальной форме.

Критериальное уравнение, описывающее теплообмен при вынужденном обтекании трубы потоком воздуха, имеет вид

$$Nu = C \cdot Re^{m}$$
(6)

где С и *m* – постоянные, определяемые из опыта;

Nu – критерий Нуссельта, определяющий соотношение теплопроводности внутри пограничного слоя жидкости и конвективной теплоотдачи на его границе;

Re – критерий Рейнольдса, характеризующий режим вынужденного движения жидкости.

При этом

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_{\rm BH}}{\lambda}, Re = \frac{\omega_{\rm cp} \cdot d_{\rm BH}}{\nu}.$$
 (7)

Здесь λ , Вт/(м·К) – коэффициент теплопроводности воздуха;

*d*_{вн}, м – внутренний диаметр трубы;

ω_{ср}, м/с – средняя скорость потока воздуха;

v, м²/с – коэффициент кинематической вязкости воздуха.

Графическое представление зависимости (6) может быть представлено в логарифмических координатах, рис.2



$$lg Nu = lg C + m lg Re$$
 (8)

Функция (8) в логарифмических координатах линейна. В соответствии с этим отрезок *lgC* отсекается прямой на оси ординат, а постоянная *m*, имеющая смысл углового коэффициента прямой, равна тангенсу ее угла наклона

Рис.2. Графическое обобщение экспериментальных данных

$$m = tg\beta. \tag{9}$$

Методика обработки экспериментальных данных сводится к определению *С* и *m* следующим образом:

- 1. По экспериментальным данным определяется коэффициент α на лабораторной модели.
- 2. По полученным значениям коэффициента α находят критерии *Nu*.
- 3. Вычисляется критерий *Re* по (7).
- 4. Пункты 1...3 повторяются для нескольких режимов.
- 5. По данным режимов строиться в логарифмических координатах прямая lg Nu = lg C + m lg Re
- 6. Из графика (рис.2, п.5) определяются С и т.
- 7. Составляется формула $Nu = C Re^m$, которая является универсальной для случаев продольного течения воздуха внутри труб.





Рис.3. Разбивка сечения трубы на четыре равновеликие части: 1...4 – точки измерения динамического напора

Рис.4. К определению физических свойств воздуха

3. Проведение эксперимента

Преподавателем задаются 2, 3 или 4 режима течения жидкости (воздуха). Для каждого режима определяются температуры воздуха на входе в трубу и

выходе из нее, динамический напор в четырех равновеликих сечениях трубы, рис.3, статический напор в выходном сечении и барометрическое давление.

Все экспериментальные данные заносятся в таблицу измерений, табл.1.

На основании измерений выполняются расчеты необходимых величин. Результаты расчетов сводятся в таблицу расчетов, табл. 2.

	Таблица измерений			Tal	блица 1		
No		Режимы					
IN≌	паименование величины	Ι	II	III	IV		
1	Температура воздушного потока на входе <i>t</i> _{вх} , °С						
2	Температура воздуха на выходе (в четырех точках сечения <i>t_i</i> , °C)	1) 2) 3) 4)	1) 2) 3) 4)	1) 2) 3) 4)	1) 2) 3) 4)		
3	Динамический напор в выходном сечении $h_{\rm Д}$, мм вод. ст. (в четырех точках сечения)	1) 2) 3) 4)	1) 2) 3) 4)	1) 2) 3) 4)	1) 2) 3) 4)		
4	Избыточное статическое давление в выходном сечении <i>Р</i> ст, мм вод.ст.						
5	Барометрическое давление <i>B</i> , мм рт. ст.						
6	Температура стенки трубы <i>t</i> _C , °C		99	,5			
7	Внутренний диаметр трубы $d_{\text{\tiny BH}}$, м		0,0	22			
8	Длина трубы в зоне теплообмена <i>l</i> , м		1,5	05			

		-		Табл	ица 2		
No	Наименование ве-	форми/ <u>то</u>		Режимы			
IN≌	личин	Φορικιγιία	Ι	II	III	IV	
1	2	3	4	5	6	7	
1	Динамический на- пор в выходном се- чении $P_{\rm Д}$, Н/м ²	$P_{ m I} = {\bf 9,81} h_{ m I}$	1) 2) 3) 4)	1) 2) 3) 4)	1) 2) 3) 4)	1) 2) 3) 4)	
2	Средняя темпера- тура потока на вы- ходе $t_{\scriptscriptstyle \rm BMX},^{\circ}{ m C}$	$t_{\rm bbix} = \frac{\sum t_i}{4}$					
3	Плотность воздуха в выходном сече- нии ρ, кг/м ³	$\rho = \rho_0 \frac{273}{273 + t_{\text{вых}}} \cdot \frac{B + \frac{P_{\text{ст}}}{13,6}}{760}$ где $\rho_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3 - \text{плотность}$ воздуха при нормальных ус- ловиях					

4	Скорости потока в выходном сечении по точкам измере- ний ω_i , м/с	$\omega_i = \sqrt{\frac{2P_{\mathcal{A}}}{\rho}}$	1) 2) 3) 4)	1) 2) 3) 4)	1) 2) 3) 4)	1) 2) 3) 4)
5	Средняя скорость потока _{Фср} , м/с	$\omega_{\rm cp} = \frac{\sum \omega_i}{4}$				
6	Объемный расход воздуха <i>V</i> , м ³ /с	$V = f \cdot \omega_{\rm cp} = \frac{\pi}{4} d_{\rm BH}^2 \omega_{\rm cp}$				
7	Массовый расход воздуха <i>G</i> , кг/с	$G = V\rho$				
8	Средняя темпера- тура воздуха в тру- бе <i>t</i> _{CP} , °C	$t_{\rm CP} = 0,5 \cdot (t_{\rm BX} + t_{\rm Bbix})$				
9	Средняя массовая изобарная тепло- емкость воздуха <i>с</i> _{<i>p</i>} , Дж/(кг·К)	$c_p = 1002, 7 + 0,027t_{\rm CP}$				
10	Теплота, отданная стенкой трубы по- току воздуха <i>Q</i> , Вт	$Q = Gc_p \left(t_{\rm bbix} - t_{\rm bx} \right)$				
11	Поверхность теп- лообмена <i>F</i> , м ²	$F = \pi d_{_{\mathrm{BH}}} l$				
12	Среднелогарифми- ческий температур- ный напор Δt , °С	$\Delta t = \frac{t_{\text{BMX}} - t_{\text{BX}}}{ln \frac{t_{\text{T}} - t_{\text{BX}}}{t_{\text{T}} - t_{\text{BX}}}}$				
13	Коэффициент теп- лоотдачи (по фор- муле Ньютона) α, Вт/м ² ·К	$\alpha = \frac{Q}{F \cdot \Delta t}$				
14	Коэффициент теп- лопроводности воз- духа λ, Вт/(м·К)	определяется по рис.4. при <i>t</i> _{СР}				
15	Критерий Нуссель- та <i>Nu</i>	$Nu = \frac{\alpha \cdot d_{\rm BH}}{\lambda}$				
16	Коэффициент ки- нематической вяз- кости v, м ² /с	определяется по рис.4. при <i>t</i> _{СР}				
17	Критерий Рей- нольдса <i>Re</i>	$Re = \frac{W_{\rm cp} \cdot d_{\rm BH}}{v}$				
18	Логарифм критерия Нуссельта <i>lg Nu</i>	lg Nu	Строится график		к за-	
19	Логарифм критерия Рейнольдса <i>lg Re</i>	lg Re	l		f(lgRe	2)
20	Логарифм постоян- ной <i>С</i>	По графику				

21	Постоянная С	$C=10^{lgC}$		
22	Угол наклона β, °	По графику		
23	Постоянная т	$m = tg\beta$		
24	Критериальная формула теплоот- дачи <i>Nu</i> _P	$Nu_{\rm P} = C \cdot Re^m$		
25	Коэффициент теп- лоотдачи (критери- альный) α _P , Вт/(м ² ·К)	$\alpha_{\rm p} = \frac{\lambda N u_{\rm p}}{d_{\rm BH}}$		
26	Относительная по- грешность опреде- ления коэффици- ента теплоотдачи разными методами δα	$\delta \alpha = \frac{\alpha_{\rm P} - \alpha}{\alpha_{\rm P}} 100 \text{\%}$		

Контрольные вопросы

- 1. Под воздействием каких сил возникает вынужденное течение жидкости? Привести примеры.
- 2. Изложите механизм теплообмена при вынужденной конвекции. В чем отличие от теплообмена при свободной конвекции? Поясните на примерах.
- 3. Каков вид критериального уравнения для определения коэффициента теплоотдачи (общий случай)?
- 4. Каков общий вид критериального уравнения для определения коэффициента теплоотдачи при вынужденной конвекции? В чем отличие от критериального уравнения для определения коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции?
- 5. В чем заключается сущность метода определения коэффициента теплоотдачи при вынужденной конвекции?
- 6. От каких величин зависит коэффициент теплоотдачи в эксперименте?
- 7. Как связан угол наклона β с коэффициентом теплоотдачи α?
- 8. Как и почему изменяется коэффициент теплоотдачи при изменении числа Рейнольдса?
- 9. Можно ли утверждать, что закономерность по определению коэффициента теплоотдачи при вынужденной конвекции, рассмотренная в эксперименте будет справедлива для любого вынужденного течения жидкости?
- 10. Как объясняется наличие (отсутствие) относительной погрешности при определении коэффициента теплоотдачи разными методами?

Литература

- 1. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергия, 1969. 439 с.
- 2. Краснощеков Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче. М.: Энергия, 1969. 264 с.
- 3. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
- 4. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. М.: Энергия, 1974. 447 с.
- 5. Шехтман А.М. Газодинамические функции реальных газов. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1988. 175 с.

Техническая термодинамика и основы теплопередачи

Сборник лабораторных работ

Методические указания

Редактор Л.Н.Ветчакова Технические редактор Г.Е.Телятникова Корректор В.В.Михальченко

Подписано в печать 17.06.2002. Тираж 200 экз. Заказ №388 Отпечатано в типографии НГТУ 630092, г.Новосибирск, пр. К.Маркса, 20