

Министерство образования и науки Республики Казахстан

Павлодарский государственный университет  
им. С. Торайгырова

Энергетический факультет

Кафедра теплоэнергетики

# **ТЕПЛОМАССООБМЕН**

Методические указания к лабораторным работам  
для студентов специальности 050717 "Теплоэнергетика"

Павлодар  
Кереку  
2010

УДК 621.1.016.4(07)

ББК 31.31я7

Т34

**Рекомендовано к изданию заседанием кафедры  
теплоэнергетики энергетического факультета Павлодарского  
государственного университета им. С. Торайгырова**

**Рецензент:**

кандидат технических наук, доцент С.А.Глазырин

**Составитель Ж.А. Тулебаева**

Т34 Тепломассообмен : методические указания  
к лабораторным работам для студентов специальностей 050717  
"Теплоэнергетика", / сост. Ж.А. Тулебаева – Павлодар:  
Кереку, 2010. – 42 с.

В методических указаниях приводятся материалы для подготовки к лабораторным работам и методика их выполнения по дисциплине "Тепломассообмен", приведены цели выполнения работ. Методические указания разработаны в соответствии с рабочим учебным планом специальности 050717 "Теплоэнергетика" и рабочей программой.

УДК 621.1.016.4(07)

ББК 31.31я7

© Тулебаева Ж.А., 2010

© ПГУ им. С. Торайгырова, 2010

За достоверность материалов, грамматические и орфографические ошибки  
ответственность несут авторы и составители

## Введение

Данные методические указания по дисциплине «Тепломассообмен» разработаны для студентов специальности 050717 «Теплоэнергетика».

Теплообмен или теплопередача – это процесс переноса теплоты внутри тела или от одного тела к другому, обусловленный разностью температур. Интенсивность переноса теплоты зависит от свойств вещества, разности температур и подчиняется экспериментально установленным законам природы. Чтобы создавать эффективно работающие системы нагрева или охлаждения, разнообразные двигатели, энергоустановки, системы теплоизоляции, нужно знать принципы теплопередачи. В одних случаях теплообмен нежелателен (теплоизоляция плавильных печей, космических кораблей и т.п.), а в других он должен быть как можно больше (паровые котлы, теплообменники, кухонная посуда).

В методических указаниях к лабораторным работам рассмотрены следующие вопросы и понятия: виды теплообмена, законы теплообмена, температурное поле, изотермическая поверхность, тепловой поток, плотность теплового потока, установившийся и неуставившийся тепловой режим, передача теплоты через стенки различной формы, сложный теплообмен, конвективный теплообмен, законы теплопередачи, коэффициенты теплопроводности, теплоотдачи и теплопередачи, критериальные числа, режимы течения, виды конвекций и т.д.

# **Лабораторная работа № 1 Определение коэффициента теплопроводности материала по методу цилиндрического слоя**

## **Цель работы**

Ознакомление с методикой экспериментального определения коэффициента теплопроводности материала цилиндрической формы и углубление знаний по теплопроводности.

### **1.1 Вводная часть**

Источником тепловой энергии является кинетическая энергия микрочастиц тела, которая вместе с потенциальной энергией микрочастиц в термодинамике определяется как внутренняя энергия тела.

При столкновении двух молекул кинетическая энергия передается от более быстрой молекулы к менее быстрой, т.е. кинетическая энергия быстрой молекулы уменьшается, а медленной увеличивается. Обратный процесс невозможен, т.к. медленная молекула попросту не догонит быструю молекулу. При этом изменение кинетической энергии молекул равно работе, совершаемой силами инерции при изменении скорости молекул. Макроскопическим параметром, характеризующим среднюю кинетическую энергию молекул, является температура.

Самопроизвольный необратимый процесс передачи кинетической энергии быстрых молекул медленным молекулам называется теплообменом или теплопереносом.

Обмен кинетической энергии между молекулами может происходить не только при их столкновении, но и путем испускания и поглощения различных частиц (гравитонов, фотонов, электронов и т.п.), несущих определенный запас кинетической энергии. В соответствии с этим различают три способа переноса энергии (передачи кинетической энергии): тепловое излучение, теплопроводность и конвекцию.

Если носителями кинетической энергии являются только фотоны, то в этом случае процесс теплообмена называется тепловым излучением. Тепловое излучение в чистом виде имеет место только в космосе или вакууме.

В случае теплопроводности носителями кинетической энергии могут быть как различные частицы, испускаемые молекулами, так и сами молекулы, если результирующий поток

молекул во всех направлениях равен нулю, т.е. нет макроскопического перемещения среды в пространстве. Так, в металлах носителями кинетической энергии в основном являются свободные электроны; в жидкостях и твердых телах-диэлектриках фононы (частицы упругих волн подобно фотонам частицам электромагнитных волн); в газах молекулы и атомы.

Теплопроводность в чистом виде большей частью имеет место в твердых телах. В жидкостях и газах чистая теплопроводность может быть реализована лишь при условии отсутствия макроскопического перемещения среды в пространстве. Конвекция (от латинского *convectio* - перенос, доставка) возможна только в текучей среде. В случае конвекции носителями кинетической энергии являются молекулы, которые наряду с хаотическим движением внутри некоторого элементарного объема (макрочастицы), совершают направленное движение в пространстве вместе с самой макрочастицей.

Количество кинетической энергии, переданное молекулам системы через всю ее поверхность в процессе теплообмена за время  $t$ , называется теплотой  $Q$ , Дж (чтобы не путать обозначение времени с температурой Цельсия, для обозначения последней можно ввести символ  $T_c$ . Все величины имеют одинаковую единицу температуры - Кельвин (К) подобно тому, как все виды давления имеют одинаковую единицу давления - Паскаль (Па);  $T$  - температура (абсолютная), К;  $T_0 = 273,15$  К - температура таяния льда;  $T_c$  - температура Цельсия.

В термодинамике под теплотой понимается та часть изменения кинетической энергии молекул системы, в произвольном процессе, которую пока не удастся рассчитать как произведения силы на перемещение, т.е. как работу микроперемещения. Согласно 1-му закону термодинамики теплоту можно определить как разность изменения кинетической энергии молекул и работы макроперемещения внешних сил или как сумму внутренней энергии и работы изменения объема внутренних сил

$$dQ = dE_K - dL_{\text{внеш}} - dE_K - (-P_{\text{мол}}dV - pdV) = dU + pdV \quad (1.1)$$

Поскольку теплота в общем случае не характеризует полное изменение кинетической энергии молекул, то она не может рассматриваться как функция состояния,

изменение которой характеризует полное изменение кинетической энергии микрочастиц системы.

Количество теплоты, проходящее в единицу времени через изотермическую поверхность, называется тепловым потоком  $\Phi$ , Вт,

$$\Phi = dQ / dt; \quad Q = \int \Phi dt \quad (1.2)$$

Тепловой поток проходящий через единицу площади поверхности теплообмена, называется плотностью теплового потока  $\varphi$ , Вт/м<sup>2</sup>,

$$\varphi = d\Phi/dA = d^2Q/dA*dt; \quad Q = \iint \varphi dA*dt \quad (1.3)$$

Согласно закону Фурье вектор плотности теплового потока  $\varphi$  пропорционален и противоположен по направлению градиенту температуры

$$\text{grad}T = n_0 dT/dn \quad (1.4)$$

$$\varphi = -\lambda \text{grad}T = -\lambda (dT/dn) n_0 \quad (1.5)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, физическая величина, характеризующая теплопроводящие свойства вещества, Вт/(мК). Зависит от агрегатного состояния вещества (таблица 1.2), его атомно-молекулярного строения, температуры и давления, состава (в случае смеси или раствора) и т.д.;

$n_0$  - единичный вектор, нормальный к изотермической поверхности и направленный в сторону возрастания температуры;

$dT/dn$  - производная от температуры по направлению нормали  $n$ .

Градиент температуры - это вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры и численно равный производной от температуры в направлении нормали. Градиент температуры характеризует наибольшее изменение температуры на единицу длины в данной точке пространства.

На основании закона Фурье выводятся зависимости для расчета теплопроводности плоской стенки

$$\Phi = (\lambda/\delta)(T_1 - T_2)A \quad (1.6)$$

и цилиндрической стенки

$$\Phi = (2\pi l \lambda / \ln(d_2/d_1)) * (T_1 - T_2) \quad (1.7)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  - температура горячей и холодной поверхностей стенки, К;

$\delta$  - толщина стенки, м;

$A$  - площадь поверхности стенки, м<sup>2</sup>;

$d_1$  и  $d_2$  - внутренний и наружный диаметры стенки цилиндрической, м;

$\lambda$  - теплопроводность материала стенки, Вт/(м К).

## 1.2 Методика экспериментального определения теплопроводности материала

В данной работе определяется теплопроводность сыпучего материала методом цилиндрического слоя (трубы). Сущность метода состоит в том, что испытуемому материалу придают форму цилиндрической трубы. В центре трубы равномерно по длине расположен электронагреватель, причем длина трубы должна быть больше в 30 раз для создания одномерного теплового потока через слой исследуемого материала. Для уменьшения тепловых потерь через торцы трубы, они дополнительно теплоизолируются. Если пренебречь тепловыми потерями через торцы трубы, то тепловой поток  $\Phi$ , Вт, проходящий через слой исследуемого материала, может быть найден непосредственно путем измерения мощности  $P$ , потребляемой электронагревателем, или по величине силы тока  $I$  и падению электронного напряжения в нагревателе  $U$ .

$$\Phi = P = IU \quad (1.8)$$

Теплопроводность исследуемого материала находится из уравнения 1.7

$$\lambda = (\Phi l \ln d_2 / d_1) / 2\pi l (T_1 - T_2) \quad (1.9)$$

где  $l$  - длина цилиндрического слоя из исследуемого материала, м;

$d_2$  и  $d_1$  - внутренний и наружный диаметры цилиндрического слоя, м;

$\bar{T}_1$  и  $\bar{T}_2$  средние арифметические температуры внутренней и наружной поверхностей цилиндрического слоя, К.

Таблица 1.2 – Коэффициенты теплопроводности некоторых веществ

Вещество	$T, K$	$\lambda, \text{Вт/(м К)}$	Вещество	$T, K$	$\lambda, \text{Вт/(м К)}$
1	2	3	4	5	6
<u>Газы.</u>			<u>Жидкости.</u>		
Водород	0	0.1655	Ртуть	0	7.82
Гелий	0	0.1411	Вода	20	0.599
Кислород	-3	0.0237	Ацетон	16	0.190
Азот	4	0.0266	Этиловый спирт	20	0.167
Воздух	0		Бензол	22.5	0.158
<u>Металлы.</u>	0		<u>Минералы</u>		
Серебро	0	429	<u>и</u>		
Медь	0	403	<u>материалы.</u>		
Золото	0	311	Хлорид	0	6.9
Алюминий	0	202	натрия	0	4.9
Железо	0	86.5	Турмалин	18	0.4/ 1
Олово	0	68.2	Стекло	18	0.16/0.25 0.12
Свинец	0	35.6	Дерево	18	0.30/0.38
			Асбест	18	1.23/0.34
			Песок	0+160	
			Текстолит	20	

Теплопроводность исследуемого материала находится из уравнения 1.9

### 1.3 Описание лабораторной установки

Опытная установка (рисунок 1.1) состоит из внешней металлической трубы, диаметром  $d_2$ , внутри которой концентрично установлена металлическая труба, диаметром  $d_1$ , промежуток между этими трубами заполнен исследуемым сыпучим материалом. В стенки труб заделаны горячие спаи термомпар (по три термомпары на трубу). Внутри трубы вставлена керамическая трубка, в которой установлен электронагреватель. Мощность



электронагревателя замеряется ваттметром и может регулироваться с помощью лабораторного автотрансформатора ЛАТРа. Значения температур определяется с помощью милливольтметра 8, который поочередно подключается к каждой термопаре с помощью переключателя. Торцы трубы теплоизолированы специальными крышками.

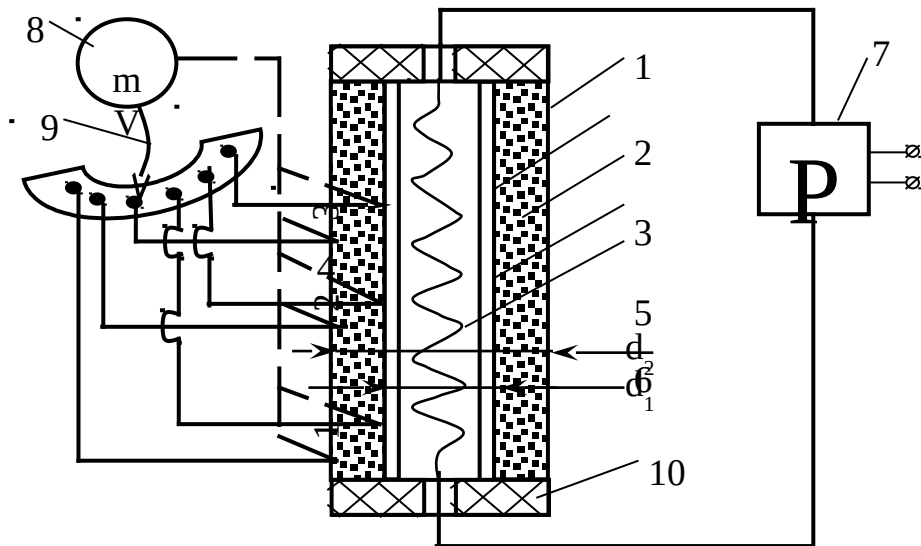


Рисунок 1.1 – Опытная установка

## 1.4 Порядок выполнения работы

1.4.1 Ознакомиться с приборами и устройством лабораторной установки.

1.4.2 Под руководством преподавателя включить электропитание установки и установить заданную мощность нагревателя.

1.4.3 Подключить милливольтметр к одной из термопар с помощью переключателя 9 и дождаться наступления стационарного теплового режима, о чем будет свидетельствовать неизменность показаний милливольтметра во времени.

1.4.4 Произвести замеры следующих величин:

- температуры на внутренней трубе  $T_4$ ,  $T_5$  и  $T_6$ ;
- температуры на внешней трубе  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$ ;
- мощность электронагревателя  $P$ , Вт или силы тока  $I$ , А и падения напряжения  $U$ , В;
- записать геометрические размеры  $d_1$ ,  $d_2$  и  $l$ , м, которые указаны на установке.

1.4.5 При обработке результатов измерений вычислить:  
а) средние значения температур на внутренней трубе

$$\checkmark T_1 = (T_4 + T_5 + T_6) / 3 \quad (1.10)$$

и на внешней трубе

$$\checkmark T_2 = (T_1 + T_2 + T_3) / 2 \quad (1.11)$$

б) среднюю температуру исследуемого материала

$$T_{\text{мат}} = (\checkmark T_1 - \checkmark T_2) / 2 \quad (1.12)$$

в) теплопроводность материала  $\lambda$  по формуле (2.2).

1.4.6 Повторить опыт 3 раза, меняя мощность нагрева с помощью ЛАТНа по показаниям ваттметра или вольтметра (например,  $U = 100, 150$  и  $200$  В).

1.4.7 Данные измерений и расчетов занести в таблицу 4.1.

1.4.8 Построить зависимость теплопроводности материала от температуры  $\lambda = f(T_{\text{мат}})$ .

1.4.9 Определить предельную относительную ошибку измерений теплопроводности материала  $\epsilon_n(\lambda)$  по формуле (1.2).

Отчет о работе должен содержать наименование и цель работы, краткое описание методики экспериментального определения, схему лабораторной установки, график зависимости  $\lambda = f(T_{\text{мат}})$ , таблицу и необходимые расчеты.

Таблица 1.3 – Результаты измерений

$\Phi=P,$ Вт	$T_1, \text{ К}$	$T_2, \text{ К}$	$T_3, \text{ К}$	$T_4, \text{ К}$	$T_5, \text{ К}$	$T_6, \text{ К}$	$\checkmark T_1, \text{ К}$	$\checkmark T_2, \text{ К}$	$T_{\text{мат}},$ К	$\lambda,$ Вт/мК
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

### Контрольные вопросы

- 1 Сущность метода цилиндрического слоя.
- 2 Способы переноса теплоты.
- 3 Закон Фурье.
- 4 Зависимости для расчета теплового потока через

плоскую цилиндрическую стенку.

## **Лабораторная работа №2 Исследование теплоотдачи при свободной конвекции в неограниченном объёме**

### **Цель работы**

Ознакомление с методикой экспериментального определения коэффициента теплоотдачи и коэффициентов критериального уравнения при свободной конвекции в неограниченном объёме и изучение сложного теплообмена.

### **2.1 Вводная часть**

Сложный теплообмен. Различают три элементарных способа переноса теплоты в пространство: теплопроводность, конвекцию и тепловое излучение.

Теплопроводность представляет собой способ переноса теплоты в телах (или между ними) путем энергообмена между микрочастицами вещества. Теплопроводность в чистом виде имеет место лишь в твердых телах.

Конвекция представляет собой способ переноса тепла путем перемещения вещества из области с одной температурой в область с другой температурой. Конвекция возможна только в текучей среде. При этом перенос теплоты неразрывно связан с переносом самой среды.

Тепловым излучением называется способ переноса тепла с помощью электромагнитных волн.

Разделение общего процесса переноса теплоты на элементарные явления – теплопроводность, конвекцию и излучение – производится в основном из методологических соображений. В действительности же эти явления протекают одновременно и влияют друг на друга.

Совместный перенос теплоты конвекцией и теплопроводностью называется конвективным теплообменом. Совместный перенос тепла теплопроводностью и излучением называется радиационно-кондуктивным теплообменом. Совместный перенос тепла излучением, конвекцией и теплопроводностью называется радиационно-конвективным или сложным теплообменом. Примером сложного теплообмена является теплообмен между газом и стенкой. В данной работе исследуется радиационно-конвективный теплообмен между нагретым горизонтальным цилиндром и окружающей средой

(воздухом), где в качестве основного явления рассматривается конвективный теплообмен.

Теплоотдача при свободной конвекции в неограниченном пространстве. Процесс теплообмена при свободной конвекции (при свободном движении) происходит в следствии разности нагретых и холодных частиц жидкости в гравитационном поле. Возникновение и интенсивность конвективного теплообмена определяется тепловыми условиями процесса и зависит от рода жидкости, разности температур, напряженности гравитационного поля и объёма пространства, в котором происходит процесс. При теплообмене температура жидкости переменна, поэтому возникает разность плотностей и как следствие разность гравитационных сил, представляющих собой архимедову или подъёмную (опускную) силу. Например, при соприкосновении воздуха с нагретым телом воздух нагревается, становится легче и поднимается вверх, т.е. воздух у поверхности тела движется снизу вверх, на его место поступают новые холодные частицы, которые также нагреваются и поднимаются вверх. При свободной конвекции движение жидкости (воздуха) возникает без внешнего возбуждения в результате самого процесса теплообмена.

Интенсивность конвективного теплообмена характеризуется коэффициентом теплоотдачи  $\alpha$ , который определяется по формуле Ньютона-Рихмана

$$Q = \alpha(t_c - t_{ж})F \quad (2.1)$$

Согласно этому закону тепловой поток  $Q$  пропорционален поверхности теплообмена  $F$  и разности температур стенки и жидкости (под жидкостью может пониматься и газ).

Коэффициент теплоотдачи можно определить как количество теплоты, отдаваемое в единицу времени единице поверхности при разности температур между поверхностью и жидкостью, равной одному градусу, Вт/(м<sup>2</sup>/К)

$$\alpha = \frac{Q}{F \cdot (t_c - t_{ж})} \quad (2.2)$$

В общем случае коэффициент теплоотдачи является сложной функцией формы  $\Phi$ , размеров  $1$ , температуры стенки и жидкости, скорости жидкости и её физических свойств – коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , теплоемкости  $C_p$ , плотности  $P$ , коэффициента вязкости  $\mu$  и других факторов

$$\alpha = f(W, t_c, t_{жс}, \lambda, C_p, p, \mu, \Phi, l \dots) \quad (2.3)$$

Число Прандтля является теплофизической характеристикой теплоносителя

$$Pr_{джс} = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda} \quad (2.4)$$

$Pr = const$  и, тогда зависимость можно представить в виде  $Nu_{джс} = c \cdot Gr^n$ . Постоянные  $c$  и  $n$  являются искомыми величинами в этом уравнении. Методики экспериментального определения коэффициента теплоотдачи и коэффициентов критериального уравнения. В условиях опыта тепло рассеиваемое нагревателем передается боковой поверхностью горизонтального цилиндра в окружающее пространство путем теплового излучения, конвекцией и теплопроводностью и может быть определено по эквивалентной мощности электронагревателя

$$Q = Q_{эл} = I \cdot \Delta U \quad (2.5)$$

где  $I$  - величина тока, А;

$\Delta U$  - падение напряжения в нагревателе, Вт.

Суммарный тепловой поток  $Q$  складывается из тепловых потоков путем конвективного теплообмена  $Q_k$  и излучения  $Q_l$ , определяемого по формуле лучистого теплообмена

$$Q = Q_k + Q_l = \alpha F (t_{жс} - t_c) + \varepsilon c_0 F \left[ \left( \frac{T_c}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{жс}}{100} \right)^4 \right] \quad (2.6)$$

Откуда находится коэффициент теплоотдачи  $\alpha$

$$\alpha = \frac{\frac{Q}{F} - \varepsilon_0 c_0 F \left[ \left( \frac{T_c}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{жс}}{100} \right)^4 \right]}{(t_c - t_{жс})} \quad (2.7)$$

где  $F = \pi d l$  - боковая поверхность цилиндра диаметром  $d$  и длиной  $l$ ;

$c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}^2)$  - коэффициент абсолютно чёрного тела;

$\varepsilon$  - степень черноты поверхности цилиндра (для поверхности цилиндра из окисленной стали можно принять  $\varepsilon = 0,79$ , а для фарфоровой трубы  $\varepsilon = 0,92$ );

$T_c$  и  $T_{жс}$  - температура стенки трубы и окружающей среды (воздуха вдали от поверхности цилиндра), К.

Для определения постоянных  $s$  и  $n$  вычисляются численные значения критериев Нуссельта и Грасгофа. Затем по найденным значениям этих критериев строится график в логарифмических координатах.

Эту зависимость можно значительно упростить, если представить её в виде критериального уравнения, которое для естественной конвекции имеет вид

$$N_{и} = f(G_r P_r) \quad (2.8)$$

Число Грасгофа характеризует относительную эффективность подъемной силы, вызывающей свободно-конвективное движение среды

$$G_{rdжс} = g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot \frac{d^3}{\nu^2} \quad (2.9)$$

где  $g$  - ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;

$\beta$  - температурный коэффициент объёмного расширения среды (для газа  $\beta = 1/T_{жс}$ ,  $1/K$ );

$\Delta t = t_c - t_{жс}$  - характерный температурный напор;

$d$  - диаметр трубы, м;

$\nu$  - кинематический коэффициент вязкости (выбирается в зависимости от температуры жидкости по соответствующим таблицам, например, для воздуха по таблице 5.1.1)

Число Нуссельта характеризует интенсивность процесса конвективного теплообмена и из него определяется коэффициент теплоотдачи  $\alpha$

$$N_{уджс} = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} \quad (2.10)$$

где  $d$  - диаметр трубы, м;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности теплоносителя, выбирается в зависимости от его температуры,  $Вт/(м \cdot К)$ .

Таблица 2.1 – Физические параметры воздуха при  $P=760$  мм. ст.

$t, ^\circ C$	$\rho, кг / м^3$	$C_p, Дж / (кг \cdot К)$	$\lambda, Вт / (м \cdot К)$	$\mu \cdot 10^6, Па \cdot с$	$P_r$	$\nu \cdot 10^6, м / с$
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>

0	1,294	1005	0,0244	17,2	0,707	13,82
10	1,247	1005	0,0259	17,6	0,705	14,16
20	1,205	1005	0,0261	18,1	0,703	15,06
30	1,165	1005	0,0267	18,6	0,701	16,00
40	1,128	1005	0,0276	19,1	0,699	16,96
50	1,093	1005	0,0283	19,6	0,698	17,95

Индексы "d" и "ж" у критериев подобия указывают на то, что в качестве определяющего размера (для горизонтальной трубы) берется диаметр трубы, а за определяющую температуру берется температура жидкости или газа  $t_{жс}$ .  $\ln Nu = f(\ln Gr)$ . В указанных координатах опытные данные описываются прямолинейно зависимостью вида

$$\ln Nu = \ln C + n \ln Gr \quad (2.11)$$

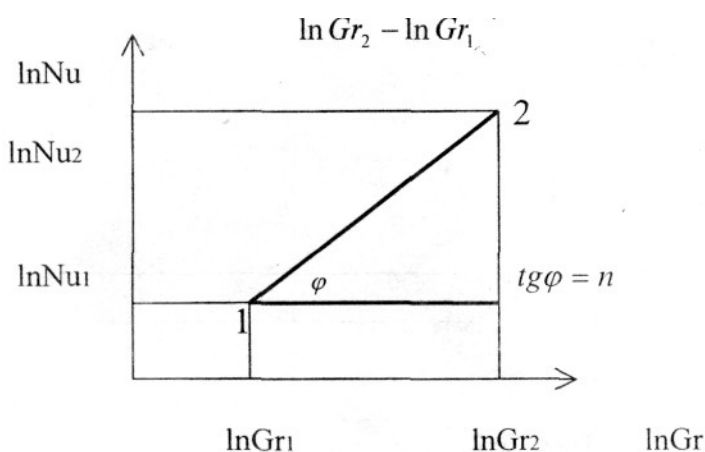


Рисунок 2.1 – Определение углового коэффициента

Значение  $n$  в этом уравнении характеризует угловой коэффициент (тангенс наклона) прямой на графике. Взяв на этой прямой две какие-либо произвольные точки с координатами  $\ln Nu_1, \ln Gr_1$  и  $\ln Nu_2, \ln Gr_2$ , можно вычислить угловой коэффициент (рисунок 2.1)

$$n = \frac{\ln Nu_2 - \ln Nu_1}{\ln Gr_2 - \ln Gr_1} \quad (2.12)$$

Используя уравнение (2.11), можно найти постоянную  $c$

$$c = \frac{Nu_1}{Gr_1^n} \quad (2.13)$$

Подставляя найденные значения  $c$  и  $n$  в уравнение (2.11), получим конкретный вид критериального уравнения для горизонтальных труб при свободной конвекции в неограниченном объёме.

## 2.2 Описание лабораторной установки

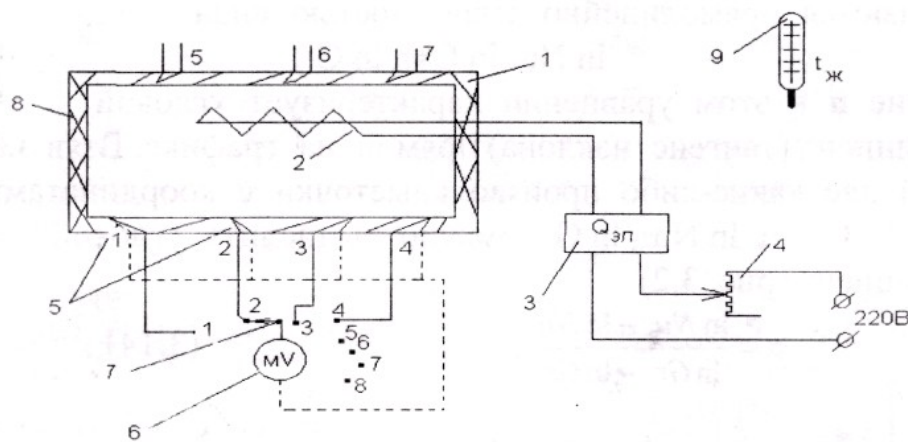


Рисунок 2.2 – Схема лабораторной установки

Установка состоит из горизонтального цилиндра 1 (из стали или фарфора) с вмонтированным в него нагревателем 2 (рисунок 2.2). Мощность нагревателя измеряется ваттметром 3 и может регулироваться с помощью лабораторного автотрансформатора 4. Для измерения средней температуры стенки трубы на её поверхности установлены горячие спаи термопар 5, причём в нижней части трубы, где температура измеряется наиболее значительно, термопары установлены чаще. Значения температур измеряются с помощью милливольтметра 6, который поочерёдно подключается к каждой термопаре с помощью переключателя 7. Для уменьшения тепловых потерь через торцы трубы они изолируются крышками 8. Температура окружающей среды (воздуха)  $t_{жс}$  измеряется термометром 9, который должен быть расположен не ближе одного метра от трубы.

## 2.3 Порядок выполнения работы



2.3.1 Ознакомится с приборами и устройством лабораторной установки.

2.3.2 С разрешения преподавателя включить электропитание установки и установить заданную мощность нагревателя.

2.3.3 Подключить милливольтметр к одной из термопар с помощью переключателя 7 и дождаться наступления стационарного теплового режима, о чём свидетельствует неизменность показаний милливольтметра во времени.

2.3.4 Произвести замеры следующих величин:

а) температур на поверхности трубы  $t_1, t_2, t_3 \dots t_7, ^\circ C$ ;

б) температуру воздуха  $t_{\text{вк}}, ^\circ C$ ;

в) мощности электронагревателя или тока и падения напряжения, если в схеме установки нет ваттметра;

г) записать геометрические размеры трубы  $d$  и  $l$ , которые указаны на установке ( $d_1=0,020$  м;  $d_2=0,036$  м;  $l=0,72$  м).

2.3.5 При обработке результатов измерений вычислить:

а) Среднюю температуру стенки трубы  $t = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_7}{7}$

б) Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  по формуле (2.7);

в) Критерии Нуссельта и Грасгофа по формулам (2.8) и (2.9) и их натуральные логарифмы.

2.3.6 Повторить опыт три раза, меняя мощность нагрева с помощью ЛАТРа, ориентируясь по показаниям вольтметра (например,  $U=100, 150, 200$ В).

2.3.7 Данные измерений и расчётов занести в таблицу 2.1.

2.3.8 Построить прямолинейную зависимость  $\ln Nu = f(\ln Gr)$ .

2.3.9 Определить постоянные критериального уравнения  $s$  и  $n$  по формулам (2.12) и (2.13).

Таблица 2.2 – Результаты измерений

$I, A$	$\Delta U, B$	$Q_{\text{эл}}, Bm$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$t_7$	$t_{\text{вк}}$	$t_{\text{н}}$	$\alpha$	$\lambda$	$N_u$	$G_r$	$\ln G_r$	$\ln N_u$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18

Отчет по работе должен содержать наименование и цель работы, краткое описание методики экспериментального определения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ , схему лабораторной установки, график зависимости  $\ln Nu = f(\ln Gr)$ , таблицу и необходимые расчеты.

### Контрольные вопросы

- 1 Способы переноса тепла в пространстве.
- 2 Сложный теплообмен.
- 3 Уравнение Ньютона-Рихмана.
- 4 Что такое коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  и от каких факторов он зависит?
- 5 Критериальное уравнение для свободной конвекции в неограниченном пространстве.
- 6 Как определялись в работе постоянные критериального уравнения  $s$  и  $n$ ?

### **Лабораторная работа №3 Исследование теплоотдачи при вынужденном поперечном обтекании цилиндра**

#### **Цель работы**

Ознакомление с методикой экспериментального определения среднего коэффициента теплоотдачи и постоянной  $S$  в критериальном уравнении при поперечном обтекании цилиндра (трубы).

#### **3.1 Вводная часть**

Конвективный теплообмен. Конвективным теплообменом или теплоотдачей называется процесс переноса теплоты между поверхностью твердого тела и жидкой средой путем теплопроводности и конвекции. Конвекция возможна лишь в жидкостях и газах, частицы которых могут легко перемещаться. По природе возникновения различают два вида движения - свободное и вынужденное. Свободное движение (естественная конвекция) происходит вследствие разности плотностей нагретых и холодных слоев жидкости. Вынужденное движение (вынужденная конвекция) возникает под действием посторонних возбудителей, например, насоса, вентилятора и пр. В общем случае наряду с вынужденным движением одновременно может развиваться и свободное. Относительное влияние последнего тем больше, чем больше разность температур в отдельных точках жидкости и чем меньше скорость вынужденного движения.

Интенсивность конвективного теплообмена характеризуется коэффициентом теплоотдачи  $\alpha$ , который определяется по формуле Ньютона – Рихмана. В общем случае коэффициент теплоотдачи может изменяться вдоль поверхности теплообмена, и поэтому различают средний по поверхности коэффициент теплоотдачи и местный (локальный) коэффициент теплоотдачи, соответствующий единичному элементу поверхности.

Процесс теплоотдачи неразрывно связан с условиями движения жидкости. Различают два режима течения жидкости - ламинарный и турбулентный. При ламинарном режиме течение имеет спокойный, струйчатый характер. При турбулентном режиме движение неупорядоченное, вихревое (рисунок 3.1). Режим течения зависит от числа Рейнольдса

$$Re = \omega * d / \nu \quad (3.1)$$

которое учитывает основные факторы, определяющие это течение  $\omega$  - среднюю скорость движения жидкости, м/с.

При этом характер и условия омывания передней (фронтальной) и задней (кормовой) половины цилиндра совершенно различны. В лобовой точке набегающий поток разделяется на две части и плавно обтекает переднюю часть периметра трубы. На поверхности трубы образуется пограничный слой, который имеет наименьшую толщину в лобовой точке и далее постепенно нарастает в размерах. Скорость слоев жидкости, примыкающих к внешней границе пограничного слоя, увеличивается вдоль периметра трубы, а давление в соответствии с уравнением Бернулли уменьшается. При достижении точки периметра, отвечающей углу  $\varphi = 90^\circ$  (угол отсчитывается от лобовой точки), скорость достигает наибольших значений и далее начинает уменьшаться, что сопровождается соответствующим увеличением давления и отрывом потока с образованием вихревой зоны, охватывающей кормовую часть трубы.

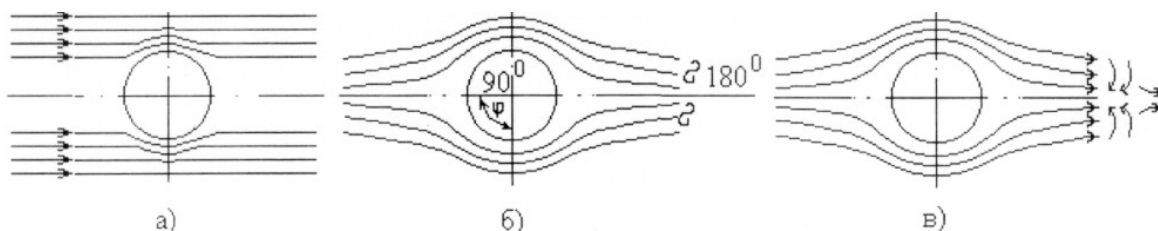


Рисунок 3.1 – Режимы течения

Такая своеобразная картина обтекания трубы в сильной мере отражается и на теплоотдаче. Интенсивность теплоотдачи по окружности трубы неодинакова. Максимальное значение коэффициента теплоотдачи наблюдается на лобовой образующей цилиндра ( $\varphi=0$ ), где толщина пограничного слоя наименьшая. По поверхности цилиндра в направлении движения жидкости интенсивность теплообмена резко падает и при  $\varphi=90 - 100^\circ$  достигает минимума. Это изменение связано с нарастанием толщины пограничного слоя, который как бы изолирует поверхность трубы от основного потока. В кормовой части трубы коэффициент теплоотдачи снова возрастает за счет улучшения отвода теплоты вследствие вихревого движения и перемещения жидкости.

В условиях опыта тепло, рассеиваемое боковой поверхностью цилиндра  $F$  в окружающее пространство путем теплового излучения, конвекцией и теплопроводностью, может быть определено по эквивалентной мощности электронагревателя. Суммарный тепловой поток  $Q$  складывается из тепловых потоков путем конвективного теплообмена  $Q_k$  и излучения

$$Q_{\text{л}} - Q = Q_k + Q_{\text{л}} = \alpha_{\varphi} * F (t_{\text{с}\varphi} - t_{\text{ж}}) + \varepsilon_{\text{с0}} * F [(T_{\text{с}\varphi} / 100)^4 - (T_{\text{ж}} / 100)^4] \quad (3.2)$$

где  $d$  - диаметр трубы, м;

$\nu$  - кинематический коэффициент вязкости (для воздуха таблица 1.1).

Переход турбулентного режима в ламинарный происходит при критическом числе Рейнольдса

$$Re_{\text{кр}}=2300$$

Если  $Re > 2300$ , то режим турбулентный, если  $Re < 2300$ , то режим ламинарный.

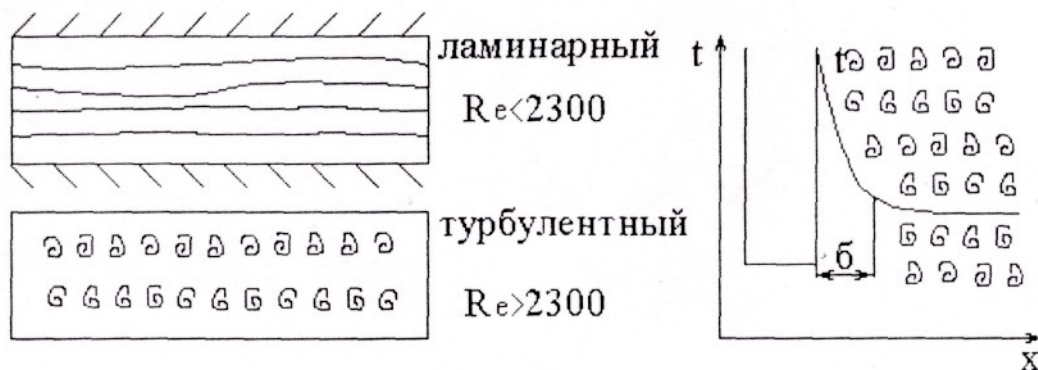


Рисунок 3.2 – Пограничный слой при различных режимах течения

При турбулентном движении весь поток насыщен беспорядочно движущимися вихрями, которые непрерывно возникают и исчезают. Однако при любом виде турбулентности в тонком слое у поверхности из-за наличия вязкости трения течения жидкости затормаживается, и скорость падает до нуля.

Для процессов теплоотдачи режим движения жидкости имеет очень большое значение, т.к. им определяется механизм переноса теплоты. При ламинарном режиме перенос теплоты в направлении нормали к стенке в основном осуществляется путем теплопроводности. При турбулентном режиме перенос теплоты путем теплопроводности происходит лишь в вязком подслое, а внутри турбулентного ядра перенос осуществляется путем интенсивного перемещения (конвекции) частиц жидкости. В этих условиях интенсивность теплоотдачи в основном определяется термическим сопротивлением пристенного подслоя толщиной  $\delta$ , где происходит наибольшее изменение температуры жидкости (рисунок 3.2).

Теплоотдача при вынужденном поперечном обтекании цилиндра. Процесс теплоотдачи при поперечном обтекании цилиндра (трубы) имеет ряд особенностей, которые объясняются гидродинамической картиной движения жидкости вблизи поверхности цилиндра. Опыт показывает, что плавный, безотказный характер обтекания цилиндра имеет место только при очень малых числах  $Re < 5$ . При значительно больших числах Рейнольдса, характерных для практики, обтекание трубы всегда сопровождается образованием в кормовой части вихревой зоны.

Откуда находится локальный (соответствующий углу  $\varphi$ ) коэффициент теплоотдачи  $\alpha_4$

$$\alpha_4 = (Q / F - \varepsilon_{co} [(T_{c\varphi} / 100)^4 - (T_{ж} / 100)^4]) / (t_{c\varphi} - t_{ж}) \quad (3.3)$$

где  $F = \Pi d l$  - боковая поверхность цилиндра диаметром  $d$  и длиной  $l$ ,  $m^2$ ;

$C_0 = 5,67 \text{ Вт} / (m^4 \cdot K^4)$  - коэффициент излучения абсолютно черного тела;

$\varepsilon$  - степень черноты поверхности цилиндра (для фарфоровой трубы  $\varepsilon = 0.92$ );

$t_{c\varphi}$  - температура стенки трубы в точке, соответствующей углу  $\varphi$ , °С,  $T_{c\varphi} = t_{c\varphi} + 273$ , К;

$t_{ж}$  - температура омывающей жидкости (газа), °С и  $T_{ж} = t_{ж} + 273$ , К.

После расчета локальных коэффициентов теплоотдачи определяется средний по периметру трубы коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  как среднее арифметическое значение

$$\alpha = \Sigma \alpha \varphi / N, \text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{К)} \quad (3.4)$$

где  $N$  - число значений локальных коэффициентов теплоотдачи.

Критерий Нуссельта вычисляется для среднего коэффициента теплоотдачи

$$\dot{N}_{удж} = \alpha \cdot d / \lambda \quad (3.5)$$

Критериальное уравнение для конвективного теплообмена при вынужденном обтекании цилиндра воздухом имеет вид

$$\dot{N}_{удж} = C \cdot Re^n \quad (3.6)$$

Поскольку в работе скорость постоянна и влияние числа  $Re$  на теплоотдачу не исследуется, то значение коэффициента  $n$  принять равным при  $Re < 10^3 n = 0,5$  и при  $Re > 10^3 n = 0,6$ .

Постоянная определяется по формуле

$$C = \dot{N}_{удж} / Re^n \quad (3.7)$$

### 3.2 Описание лабораторной установки

Исследуемый цилиндр (фарфоровая трубка) 1 с смонтированным в него нагревателем помещен в трубу 2, через которую просасывается воздух вентилятором 3.

Для определения средней по длине трубы температуры три термопары 4 на одной образующей цилиндра. Цилиндр может поворачиваться вокруг своей оси, что позволяет замерять температуру по окружности цилиндра одними и теми же термопарами. Термопары с помощью переключателя 5 подключаются к милливольтметру 6. Для определения мощности нагревателя служат амперметр 7 и вольтметр 8. Скорость потока определяется с помощью чашечного анемометра, который устанавливается в трубу 2. Измерение скорости сводится к определению числа оборотов по счетчику анемометра за соответствующий отрезок времени, измеренный секундомером. По найденному числу оборотов в минуту определяется скорость потока с помощью градуированного графика, прилагаемого к анемометру.

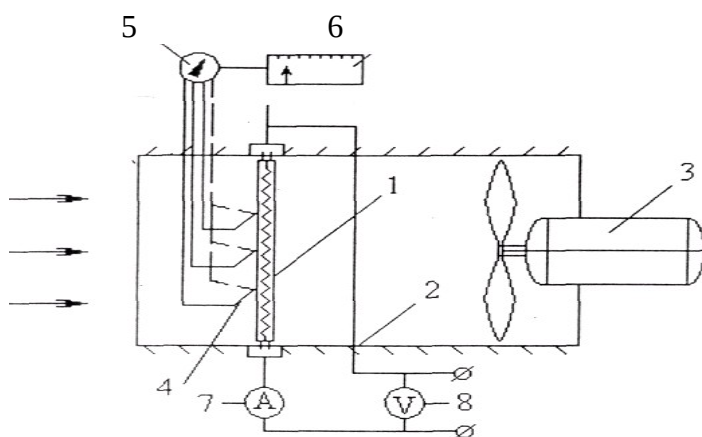


Рисунок 3.3 – Опытная установка

### 3.3 Порядок выполнения работы

3.3.1 Ознакомление с приборами и устройством лабораторной установки.

3.3.2 Включить электронагреватель цилиндра и вентилятор.

3.3.3 После наступления установившегося режима (о чем свидетельствует постоянство показаний милливольтметра) произвести следующие замеры:

- а) температуры воздуха в трубе с помощью термометра  $t_{ж}$ , °С;
- б) скорости воздуха в трубе с помощью анемометра  $\omega$ , м / с;
- в) показаний амперметра  $I$ , А и вольтметра  $\Delta U$ , В;
- г) температуры стенки цилиндра при положении термопар в лобовой точке цилиндра ( $\varphi = 0^\circ$ ) с помощью трех термопар  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$ , °С;

3.3.4 Поворачивая цилиндр вокруг своей оси, произвести замеры температур с помощью термопар  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$  через каждые  $30^\circ$  поворота цилиндра.

3.3.5 При обработке результатов опыта вычислить:

- а) тепловой поток по формуле  $Q = Q_{эл}$ , Вт;
- б) среднее значение температуры по образующей цилиндра для данного угла  $\varphi$

$$t_{ср} = t_1 + t_2 + t_3/3, \text{ }^\circ\text{C}$$

- в) локальный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1$  по формуле (3.3);
- г) средний коэффициент теплоотдачи  $\bar{\alpha}$  по формуле (3.4);
- д) критерий Рейнольдса по формуле (3.1);
- е) по найденному значению числа  $Re$  выбрать показатель степени  $n$ ;
- ж) критерий Нуссельта по формуле (3.5);
- з) постоянную  $C$  по формуле (3.7) и записать критериальное уравнение в окончательном виде применительно к условиям опыта.

3.3.6 Результаты опытов и расчетов занести в таблицу 3.1.

3.3.7 Построить график изменения относительного коэффициента теплоотдачи  $\alpha_\varphi / \bar{\alpha}$  по окружности  $\alpha_\varphi / \bar{\alpha} = f(\varphi)$ .

Таблица 3.1 – Результаты измерений

$\varphi$	$t_{ж}$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_{ср}$	$I$	$\Delta U$	$Q$	$\alpha_\varphi$	$\bar{\alpha}$	$\omega$	$Re$	$Nu$	$\alpha_\varphi / \bar{\alpha}$
град	°C					А	В	Вт	Вт/(м <sup>2</sup> ,К)		м/с			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0														
30														
60														
180														

Отчет о работе должен содержать наименование и цель работы, схему установки, основные расчетные формулы, краткую методику экспериментального определения среднего коэффициента теплоотдачи цилиндра при вынужденной конвекции, таблицу опытных и расчетных данных, график зависимости относительного коэффициента теплоотдачи от угла.

### Контрольные вопросы

1 Чем объясняется неодинаковость коэффициента теплоотдачи по окружности цилиндра?



2 Где больше значения коэффициента теплоотдачи: в боковой или лобовой точке цилиндра и почему?

3 Как в работе определяется средний коэффициент теплоотдачи по окружности цилиндра?

4 Как влияет режим течения жидкости на теплоотдачу?

5 Что называется конвективным теплообменом?

6 Ламинарный и турбулентный режим течения жидкости.

7 Что характеризует критерии Нуссельта и Рейнольдса?

## **Лабораторная работа № 4 Исследование распределения температур в сечении тел сложной формы на электрической модели**

### **Цель работы**

Целью лабораторной работы является ознакомление с методикой экспериментального определения распределения температур в сечении тела сложной формы на его электрической модели и углубление знаний по методу аналогий для решения задач теплопроводности.

### **4.1 Вводная часть**

Экспериментальным методом исследования процесса теплопроводности является метод аналогии, использование которого предполагает изучение процесса переноса теплоты теплопроводностью на основе исследования аналогических процессов. Аналогичными являются процессы, которые описываются математически тождественными уравнениями и имеют одинаковые условия однозначности, однако физическая природа и размерность величин, входящих в уравнение, различны.

Условия однозначности дают математическое описание всех частных особенностей рассматриваемого процесса, они состоят из:

- геометрических условий, характеризующих формы и размеры тела

или системы, в которых протекает процесс;

- физических условий, характеризующих физические параметры тела

или системы, равенство чисел подобия;

- начальные условия, характеризующие особенности процесса в начальный момент времени; для стационарной теплопроводности эти условия отсутствуют;

- граничные условия, характеризующие особенности протекания процесса на границе тела или системы.

Аналогичными процессами являются процессы теплопроводности, электропроводности; диффузии и движения жидкости при ламинарном режиме, т.к. они описываются идентичными по формуле записи знаками (Фурье, Ома, Фика и т.д.), которая следует из более обобщенного представления о едином, механизме переноса в пространстве субстанций любой природы (теплоты, электрических зарядов, вещества и др.), которые математически представляются в виде линейной зависимости между причиной и следствием.

При выборе аналитического процесса для исследования теплопроводности берут тот, который можно исследовать проще, измерения проводятся с большой точностью. Таким процессом является процесс электропроводности.

Аналогичность процессов теплопроводности и электропроводности следует из идентичности по формуле записи законов Фурье и Ома

$$\bar{d}\bar{Q} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} dA;$$

$$\bar{d}\bar{Q} = -\sigma_y \frac{\partial U}{\partial n_y} dA_y;$$

где  $\Phi$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м\*К);

$A$  – площадь, м<sup>2</sup>;

$J$  – сила тока

$\sigma_y$  – коэффициент электропроводности, I/(Ом\*м);

$A_y$  – площадь поперечного сечения электропроводника, м<sup>2</sup>;

$\frac{\partial T}{\partial n}$  – производная от температуры по направлению нормали  $n$ , К/м;

$\frac{\partial U}{\partial n_y}$  – производная электрического потенциала в направлении  $n_y$ ,

В/м.

В этом случае процесс теплопроводности в области твердого тела  $D(x, y, z)$  может быть имитирован путем прохождения электрического тока либо в геометрически подобной электропроводящей области  $D_y(x, y, z)$ , либо в эквивалентной

электрической схеме с сосредоточенными параметрами. На границах области  $D_3(x, y, z)$  осуществляется подвод электрического тока  $J$  или задаются электрические потенциалы  $U$  с соблюдением подобия начальных и граничных условий.

Рассмотрим стационарное температурное поле в продольном сечении стенок канала (рисунок 4.1), имеющего сложную форму.

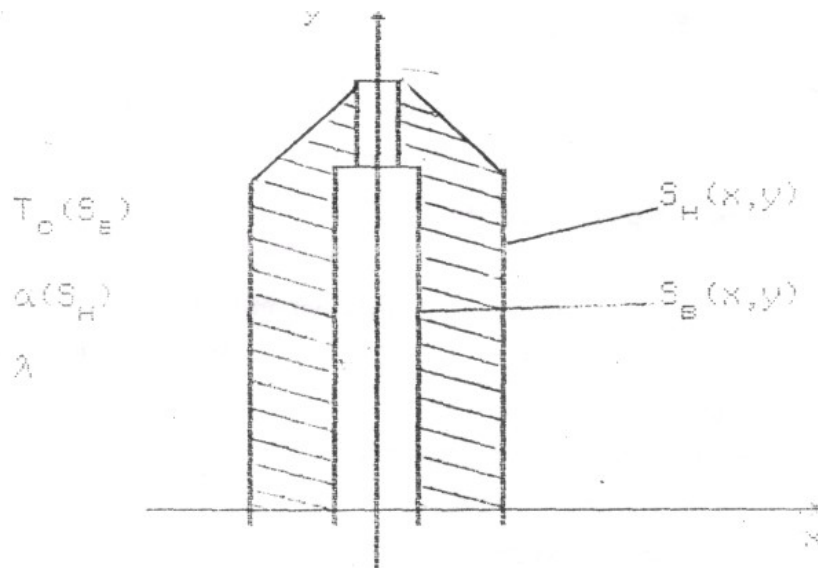


Рисунок 4.1 – Стационарное температурное поле

На внутренней поверхности задано распределение температур  $T_c(S_B)$ , а на наружном контуре происходит конвективный теплообмен с окружающей средой, имеющей температуру  $T_ж$ . Задано распределение местных коэффициентов теплоотдачи  $\alpha(S_H)$  и назначение коэффициента теплопроводности стенки  $\lambda$ . Необходимо определить температурное поле в стенках канала  $T(x, y, z)$ .

Для решения данной задачи область  $D(x, y)$  заменяют эквивалентной электрической схемой (сеткой), составленной из внутренних электрических сопротивлений  $R_B$  между узловыми точками и внешних сопротивлений  $R_H$ . При этом  $R_B$  имитируют термическое сопротивление теплопроводности, а  $R_H$  – термическое сопротивление теплоотдачи. Сетчатая модель с  $N$  узловыми точками соответствует  $D_3(x, y)$ , разбитой на  $N$  ячеек (рисунок 2), причем граничные ячейки берутся половинного размера.

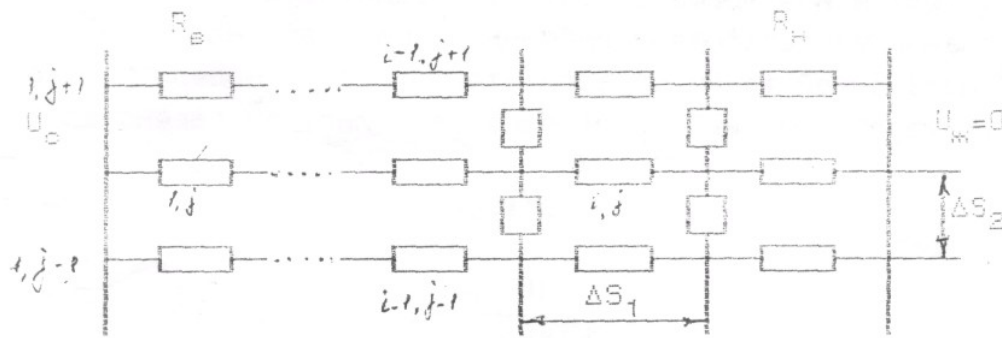


Рисунок 4.2 – Сетчатая модель с N узловыми точками

Термическое сопротивление теплопроводности для квадратных ячеек однородной стенки определяет  $R_\lambda = \Delta S_1 / \lambda$ , а термическое сопротивление теплоотдачи  $R_\alpha = l / \alpha$ , где  $\Delta S_1$  - размер стороны ячейки.

Для построения эквивалентной электрической схемы выбирают  $R_B$  обычно кратное 1, 10 или 100 Ом и задаются размером  $\Delta S_1$ .

Из равенства чисел Био для тепловой области  $D(x, y)$  и эквивалентной электрической схемы  $D_e(x, y)$  на основании равенства условий однозначности, можно получить соотношение для расчета  $R_H$

$$\left\{ \begin{array}{l} Bi = \frac{R_B \Delta S_2}{R_H} \\ Bi = \frac{R_\lambda}{R_\alpha} \end{array} \right. \quad (4.1)$$

откуда

$$R_i = \frac{R_\alpha R_B \Delta S_2}{R_\lambda} = \frac{\lambda}{\alpha} \frac{\Delta S_2}{\Delta S} R_B \quad (4.2)$$

Свободные концы сопротивлений  $R_H$  присоединяют к шине с потенциалом  $U_ж=0$ . На узловые точки, имитирующие граничные ячейки на внутреннем контуре рассматриваемого канала, подают потенциал  $U_0$ , который определяется из уравнения

$$\frac{U_c - U_a}{\dot{O}_c - \dot{O}_a} = \frac{\Delta U}{\Delta T} = Z \quad (4.3)$$

где  $Z$  – постоянная преобразования, определяемая по заданной в краевых условиях температуре и выбранному масштабу напряжений.

В полученной таким образом электрической модели в исходных точках областей  $D(x, y)$  и  $D_s(x, y)$  будет выполняться равенство

$$V_{i,j} = \theta_{i,j}, \quad (4.4)$$

где

$$V_{i,j} = \frac{U_{i,j} - U_a}{U_c - U_a} \quad (4.5)$$

$$\theta_{i,j} = \frac{T_{i,j} - T_a}{T_c - T_a} \quad (4.6)$$

Из уравнения (4.3) с использованием (4.4), (4.5), (4.6), а также учитывая, что  $U_{ж}=0$  получим  $(T_{i,j} - T_a)Z = U_{i,j}$  или

$$T_{i,j} = \frac{U_{i,j}}{Z} + T_a \quad (4.7)$$

Из уравнения (4.7) следует, что путем измерения на электрической модели потенциалов  $U_{i,j}$  можно определить значения температуры любой узловой точки стенки канала сложной геометрической формы.

## **4.2 Методика экспериментального определения распределения температур в сечении тел сложной формы**

В данной работе определение температур в сечении тел сложной формы осуществляется на основе метода электротепловой аналогии. Сущность метода состоит в том, что реальный процесс переноса теплоты исследуется аналогичным процессом переноса электрической энергии на эквивалентной электрической модели, при этом об

изменении температур в сечении канала (рисунок 4.1) судят по изменению потенциалов в узлах электрической модели.

Электрическая модель геометрически подобна реальному каналу, а ее параметры удовлетворяет уравнению (4.2). Измерение потенциалов  $U_{i,j}$  производится по уравновешенной мостовой схеме. Численное значение  $U_{i,j}/Z$  измеряется милливольтметром, причём величина  $Z$  выбрана из условия градуировки шкалы милливольтметра, чтобы его показания соответствовали значению температуры  $T_{i,j}$ .

Температура среды  $T_{ж}$  принимается постоянной равной 293 К, а также предполагается, что в исследуемой стенке отсутствуют внутренние источники теплоты, а коэффициент теплопроводности не изменяется с изменением температуры. Температура на внутренней поверхности рассматриваемого канала также постоянна и равна  $T_c$ .

С учетом указанных допущений значение температуры в любой точке сечения рассматриваемого канала определяется по уравнению (4.1) путем установки щупа в необходимую точку на электрической модели и измерения в ней значения величины  $U_{i,j}/Z$  с помощью милливольтметра.

### 4.3 Описание лабораторной установки

Лабораторная установка представляет собой электрический стенд с регулируемым источником постоянного тока (рисунок 4.1). Опытная установка состоит из эквивалентной электрической сетки 1, которая имеет внутреннюю шину 2 для создания потенциала  $U_c$  и наружной шины 3 на которой электрический потенциал  $U_{ж}=0$ . Потенциалы на шинах 2 и 1 создаются с помощью источника постоянного тока 4, а величина напряжения регулируется реостатом 5.

Измерения электрических потенциалов  $U_{i,j}$  в узлах сетки I осуществляется милливольтметром 6, который отрегулирован на измерение температуры  $^{\circ}\text{C}$  при установке щупа 7 в соответствующую узловую точку.

Электрические сопротивления  $R_3$  и  $R_4$  образуют реохорд, имеющий распределённые значения сопротивлений. Значение сопротивлений  $R_3$  и  $R_4$  подбираются для обеспечения необходимого значения  $Z$ , что обеспечивает градуировку милливольтметра в долях от общего сопротивления ( $R_3+R_4$ ).

#### **4.4 Меры безопасности**

4.4.1 Приступать к выполнению лабораторной работы разрешается только после прохождения инструктажа по правилам техники безопасности и правилам противопожарной безопасности;

4.4.2 Перед началом проведения лабораторной работы следует:

- проверить наличие заземления электрооборудования;
- наружным осмотром проверить состояние соединительных проводов, целостность изоляции;
- установить все выключатели и ручки регуляторов в исходные позиции;

4.4.3 При появлении искрения, запаха дыма немедленно обесточить лабораторную установку и сообщить о случившемся преподавателю.

#### **4.5 Порядок выполнения работы**

4.5.1 Ознакомиться с приборами и устройством лабораторной установки;

4.5.2 На листе миллиметровой бумаги выполнить в заданном преподавателем масштабе чертеж сечения исследуемого объекта (форсунки);

4.5.3 Под руководством преподавателя включить электропитание установки и установить реостатом 5 заданное значение температуры  $T_c$ ;

4.5.4 С помощью щупа 7 осуществить измерение  $U_{i,j}/Z$  в различных точках и определить положение точек в сечении исследуемого объекта, имеющих одинаковые значения температур. Определить действительное значение температуры на основе уравнения (4.7). На чертеже сечения нанести изотермы, а также определить распределение температур в сечении исследуемой стенки канала, указанного преподавателем. Построить температурное поле на чертеже в выбранном масштабе;

4.5.5 С помощью реостата 5 изменить значение температуры  $T_c$  и повторить выполнение пункта 4.5.4.

#### **Отчет по работе**

Отчет по выполненной работе должен содержать наименование и цель работы, краткое описание методики экспериментального определения температур в сечении исследуемого объекта, схему

лабораторной установим, чертеж сечения исследуемого объекта с нанесенными в масштабе температурными полями.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Какие процессы являются аналогичными?
- 2 Какие условия называются условиями однозначности?
- 3 В чем состоит сущность метода электротепловой аналогии для решения задач теплопроводности?
- 4 В чём состоят особенности начальных и граничных условий?
- 5 Принцип построения эквивалентной электрической схемы и определение на ней распределения температур в сечении исследуемого объекта?

### **Лабораторная работа №5 Определение коэффициента теплопроводности методом шарового слоя**

#### **Цель работы**

Ознакомление с методикой экспериментального определения коэффициента теплопроводности двухслойной шаровой стенки, коэффициента теплоотдачи, а также определения критического диаметра изоляции.

#### **5.1 Вводная часть**

Тепловые потоки возникают в телах при наличии разности температур между отдельными их частями. Температурное состояние тела можно охарактеризовать с помощью температурного поля, под которым понимается совокупность мгновенных значений температур во всех точках исследуемого пространства .

Температурное поле характеризуется с помощью изотермических поверхностей, т.е. геометрического места точек с одинаковым значением температуры. Для шаровых стенок, в случае отсутствия в ней внутренних источников теплоты, изотермические поверхности-сферы, имеющие общий центр.

При стационарном процессе передачи теплоты, когда температурное поле не меняется с течением времени, тепловые потоки



от горячей среды к шаровой стенке  $Q_{1-2}$ , в самой стенке  $Q_{2-3}$ , а также от стенки к холодной среде  $Q_{3-4}$  равны между собой и определяются по формуле Ньютона-Рихмана

$$Q = Q_{1-2} = \alpha_1 \pi d_1^2 (t_{ж1} - t_{c1})$$

$$Q = Q_{3-4} = \alpha_2 \pi d_2^2 (t_{c2} - t_{ж2})$$
(5.1)

и уравнением теплопроводности для шаровой стенки

$$Q = \frac{2\pi\lambda\Delta t}{\left[ \frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right]} = \pi\lambda\Delta t \frac{d_1 d_2}{\sigma}$$
(5.2)

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи соответственно со стороны горячей и холодной среды, Вт / (м<sup>2</sup>\*°С);

$d_1, d_2$  – внутренний и наружный диаметр шаровой стенки, м;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт / (м\*°С);

$t_{ж1}, t_{ж2}$  – температура горячей и холодной среды, °С;

$t_{c1}, t_{c2}$  – температура стенки со стороны горячей и холодной среды, °С

В случае, если среда является газообразной, процесс теплообмена между стенкой и омывающей ее средой является результатом совместного переноса теплоты конвективным теплообменом  $Q_k$  и тепловым излучением  $Q_l$ . Количественной характеристикой процесса теплообмена в этом случае является общий коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_{общ} = \alpha_k + \alpha_l$$
(5.3)

где  $\alpha_k$  – учитывает действие конвективного теплообмена,  $\alpha_l$  – теплового излучения.

Суммарный тепловой поток между стенкой и газовой средой определяется формулами Ньютона - Рихмана и Стефана - Больцмана

$$Q_{3-4} = Q_{(3-4)к} + Q_{(3-4)л};$$

$$Q_{3-4} = \alpha_k \pi d_2^2 (T_{c2} - T_{ж2}) + \epsilon \sigma_0 \left[ \frac{T_{c1}}{100} \right]^4 - \left[ \frac{T_{ж1}}{100} \right]^4 \pi d_2^2$$
(5.4)

или

$$Q_{3-4} = (\alpha_k + \alpha_l) \pi d_2^2 (T_{c2} - T_{ж2}) \quad (5.5)$$

где

$$\alpha_l = \frac{\varepsilon c_0 \left( \frac{T_{c1}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{ж1}}{100} \right)^4}{(T_{c2} - T_{ж2})} \quad (5.6)$$

где  $\varepsilon$  - степень черноты тела;

$c$  - излучательная способность черного тела, Вт/(м<sup>2</sup> К) ( $c_0=5,67$ ).

В ряде практических случаев ставится задача существенного уменьшения величины теплового потока, проходящего через стенку. Для этого обычно стенки покрывают слоем изоляционного материала с низким коэффициентом теплопроводности ( $\lambda < 0,25$ ).

В тоже время существует энергетическое оборудование, в котором слой изоляции образуется вследствие загрязнения или накипи поверхностей теплообмена в период его эксплуатации, что приводит к уменьшению величины тепловых потоков от одного теплоносителя к другому, проходящих через твердую двух- или многослойную стенку.

Для расчета теплового потока через многослойную шаровую стенку используют уравнение

$$Q = \frac{\pi(t_{c1} - t_{c(n+1)})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \left( \frac{1}{d_i} - \frac{1}{d_{i+1}} \right)} \quad (5.7)$$

где  $n$  - число слоев, а для определения теплопередачи от горячего теплоносителя к холодному используют уравнение теплопередачи

$$Q = k_w \pi (T_{ж1} - T_{ж2}) \quad (5.8)$$

$k_w$  - коэффициент теплопередачи, Вт/К, который вычисляется

$$k_w = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1^2} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \left( \frac{1}{d_i} - \frac{1}{d_{i+1}} \right) + \frac{1}{\alpha_2 d_{n+1}^2}} \quad (5.9)$$

При нанесении слоя изоляции на шаровую стенку одновременно с ростом термического сопротивления стенки  $R_\lambda$ , под которым

понимается величина обратная теплопроводности наблюдается увеличение наружной теплоотдающей поверхности вследствие этого уменьшается термическое сопротивление теплоотдаче  $R_{\alpha}$  от наружной поверхности.

Общее термическое сопротивление шаровой двухслойной стенки (под вторым слоем подразумевается слой изоляции) определяется формулой

$$R_{ш} = 1/k_{ш} = R_{\alpha 1} + R_{\lambda 1} + R_{\lambda из} + R_{\alpha 2} \quad (5.10)$$

где  $R_{\alpha 1} = 1/\alpha_1 d_1^2$  - термическое сопротивление теплоотдачи на внутренней поверхности шаровой стенки К/Вт;

$$R_{\lambda 1} = \frac{1}{2\lambda_1} \left[ \frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right] - \text{термическое сопротивление}$$

теплопроводности первого слоя шаровой стенки, К/Вт;

$$R_{\lambda из} = \frac{1}{2\lambda_{из}} \left[ \frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_{из}} \right] - \text{термическое сопротивление}$$

теплопроводности второго слоя шаровой стенки, К/Вт;

$R_{\alpha 2} = 1/\alpha_2 d_2^2$  - термическое сопротивление теплоотдачи от наружной поверхности шаровой стенки К/Вт.

Из рассмотрения графика изменения термического сопротивления  $R_{ш} = f(d_{из})$  следует, что результат нанесения слоя изоляции может быть различным в зависимости от диаметра изоляции и коэффициента теплопроводности.

Если  $d_{из} < d_{кр}$ , то тепловой поток от горячего теплоносителя к холодному будет увеличиваться, а при  $d_{из} > d_{кр}$  тепловой поток будет уменьшаться.

Значение критического диаметра для шаровой стенки определяется зависимостью

$$d_{кр} = \frac{4\lambda_{из}}{\alpha_{общ}} \quad (5.11)$$

Следовательно, теплоизолирующими свойствами будет обладать такой материал, для которого  $\lambda_{из} = \frac{\alpha_2 d_2}{4}$ , при этом  $d_2 > d_{кр}$ .

## 5.2 Методика экспериментального определения коэффициента теплопроводности шаровой стенки. Определение критического диаметра изоляции

В данной работе коэффициент теплопроводности материала шаровой стенки определяется методом шарового слоя. Сущность метода в том, что внутри шаровой стенки равномерно по шаровой поверхности расположен электронагреватель. Так как в шаровой стенке отсутствуют тепловые потери, то тепловой поток  $Q$ , Вт, проходящий через шаровую стенку, может быть определен непосредственно измерением мощности  $P$ , Вт, потребляемой электронагревателем, которую можно измерить ваттметром или рассчитать по величине силы тока  $I$  и падению напряжения в электронагревателе  $U$ , В

$$Q = P = UI$$

Коэффициент теплопроводности исследуемой однослойной шаровой стенки находится из уравнения (5.12)

$$\lambda_1 = \frac{Q \left[ \frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right]}{2\pi(t_{c1} - t_{c2})}, \quad (5.12)$$

При определении общего коэффициента теплопроводности двухслойной шаровой стенки используется уравнение, для случая  $n=2$

$$\lambda_{1-2} = \frac{Q \left[ \frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_3} \right]}{2\pi(t_{c1} - t_{c3})}, \quad (5.13)$$

где  $d_1, d_2, d_3$  – соответственно внутренний, наружный диаметры металлической шаровой стенки и наружный диаметр слоя изоляции, м;  
 $t_{c1}, t_{c2}, t_{c3}$  – средние арифметические значения температуры на внутренней, наружной шаровой поверхности металлической стенки и на наружной поверхности слоя изоляции  $^{\circ}\text{C}$ .

Коэффициент теплопроводности слоя изоляции определяется на основе полученных значений коэффициентов теплопроводности по уравнению

$$\lambda_{из} = \frac{\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_3}}{\frac{1}{\lambda_{1-2}} \left( \frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_3} \right) - \frac{1}{\lambda_1} \left( \frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right)}, \quad (5.14)$$

Для определения критического диаметра изоляции кроме коэффициента теплопроводности изоляции находится общий коэффициент теплоотдачи из условия, что тепловой поток прошедший через двухслойную шаровую стенку, рассеивается наружной сферической поверхностью в окружающую среду путем конвективного теплообмена и теплового излучения. Значение общего коэффициента теплоотдачи находится из уравнения (5.6) с учетом, что диаметром наружной поверхности является значение  $d_3$

$$\alpha_{общ} = \alpha_2 = \frac{Q}{\pi d_3^2 (t_{с3} - t_{ж2})}, \quad (5.15)$$

где  $T_{ж2}$  - температура окружающей среды, °С (К).

### 5.3 Описание лабораторной установки

Опытная установка (рис. 5.1) представляет собой металлическую шаровую стенку 1 с внутренним  $d_1$  и наружным  $d_2$  диаметрами, покрытую слоем изоляции 2. Наружний диаметр слоя изоляции  $d_3$ . Внутри металлической шаровой стенки помещен электронагревательный элемент 3. На внутренних и наружных сферических поверхностях вмонтированы горячие спаи термопар 4 (по три на каждой поверхности). Значения температур определяются с помощью милливольтметра 5, который поочередно подключается к каждой термопаре с помощью переключателя 6. Значения температур, также регистрируются прибором КСП-4,6 на диаграммной ленте по которой наглядно видно наступление стационарного режима (кривая изменения температур постепенно переходит в прямую линию, что означает наступление стационарного режима). Мощность электронагревателя определяется по показаниям вольтметра 7 и амперметра 8 и может регулироваться с помощью реостата 9. Температура окружающей среды измеряется ртутным термометром 10.

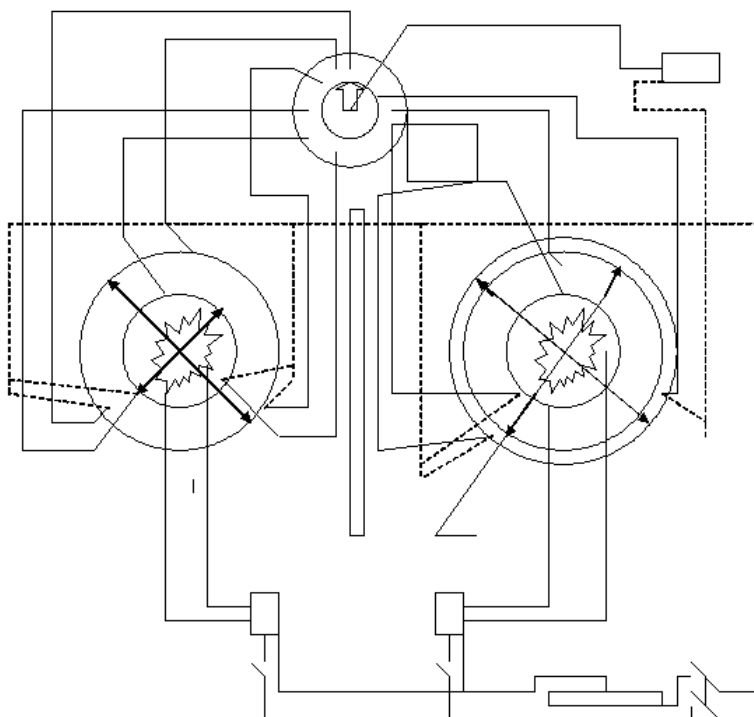


Рисунок 5.1 – Схема лабораторной сустановки

#### 5.4 Порядок выполнения работы

5.4.1 Ознакомиться с приборами и устройством лабораторной установки;

5.4.2 Перед началом выполнения лабораторной работы убедиться в наличии заземления установки, отсутствия оголенных проводов электропитания установки;

5.4.3 Под руководством преподавателя включить электропитание и установить с помощью ЛАТРа начальное значение напряжения и тока;

5.4.4 По показаниям прибора КСП-4 дождаться наступления стационарного режима;

5.4.5 Записать по показаниям:

- вольтметра значение напряжения на нагревателе  $U$ , В;
- амперметра значение тока  $I$ , А;
- прибора КСП-4 значения температур на внутренней  $T_1, T_2, T_3$  на наружной  $T_4, T_5, T_6$  поверхности металлической шаровой стенки, значения температур на поверхности слоя изоляции  $T_7, T_8, T_9$ ;

- записать геометрические размеры  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ , которые указаны на установке ( $d_1=0,061$  м;  $d_2=0,077$  м;  $d_3=0,81$  м);
- термометра -  $T_{ж2}$ .

5.4.6 Повторить опыт три раза, меняя мощность нагрева с помощью ЛАТРа.

## 5.5 Обработка результатов измерения

5.5.1 При обработке результатов измерений вычислить:

- среднюю температуру на внутренней поверхности шара

$$T_{C1} = (T_1 + T_2 + T_3) / 3$$

- среднюю температуру на наружной поверхности шара

$$T_{C2} = (T_4 + T_5 + T_6) / 3$$

- среднюю температуру на поверхности слоя изоляции

$$T_{C3} = (T_7 + T_8 + T_9) / 3$$

5.5.2 Определить:

- коэффициент теплопроводности однослойной шаровой стенки  $\lambda_1$  по формуле (5.12);
- коэффициент теплопроводности двухслойной шаровой стенки по формуле (5.13);
- коэффициент теплопроводности слоя изоляции по формуле (5.14);
- коэффициент теплоотдачи по формуле (5.15);
- критический диаметр изоляции по уравнению (5.11).

5.5.3 Вычислить предельную относительную погрешность коэффициента теплопроводности однослойной и двухслойной шаровой стенки по формулам

$$\varepsilon_n(\lambda_1) = \Delta\lambda_1/\lambda_1 = \left[ \Delta U/U + \Delta I/I + \Delta d/(d_2 - d_1) + \Delta d/d_1 + \Delta d/d_2 + \Delta T/(T_{C1} - T_{C2}) \right] 100\%$$

$$\varepsilon_n(\lambda_{1-2}) = \Delta\lambda_{1-2}/\lambda_{1-2} = \left[ \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta d}{(d_3 - d_1)} + \frac{\Delta d}{d_3} + \frac{\Delta d}{d_1} + \frac{\Delta T}{(T_{c1} - T_{c3})} \right] 100\%$$

где  $\Delta U$ ,  $\Delta I$ ,  $\Delta d$ ,  $\Delta T$  – предельные абсолютные погрешности измерений напряжения, тока, диаметра, температуры.

Дать заключение о целесообразности применения имеющегося изоляционного материала, используемого для рассматриваемой шаровой стенки

5.5.4. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 – Результаты измерений и расчетов

Наименование		Количество опытов		
		1	2	3
Сила тока I, А				
Падение напряжения на нагревателе U, В				
Мощность нагревателя P, Вт				
Температуры, К	T <sub>1</sub>			
	T <sub>2</sub>			
	T <sub>3</sub>			
	T <sub>c1</sub>			
	T <sub>4</sub>			
	T <sub>5</sub>			
	T <sub>6</sub>			
	T <sub>c2</sub>			
	T <sub>7</sub>			
	T <sub>8</sub>			
	T <sub>9</sub>			
T <sub>c3</sub>				
Коэффициент теплопроводности однослойной шаровой стенки $\lambda_1$ , Вт/(м К)				
Коэффициент теплопроводности двухслойной шаровой стенки $\lambda_{1-2}$ , Вт/(м К)				
Коэффициент теплопроводности слоя теплоизоляции $\lambda_{из}$ , Вт/(м К)				
Коэффициент теплоотдачи от слоя теплоизоляции в окружающую среду $\alpha_2$ , Вт/(м <sup>2</sup> К)				
Критический диаметр изоляции $d_{кр}$ , м				
Предельные абсолютные погрешности	$\varepsilon_n(\lambda_1)$ %			
	$\varepsilon_n(\lambda_{1-2})$ %			



## **Отчет по работе**

Отчет по работе должен содержать наименование и цель работы, схему установки, основные расчетные формулы, краткую методику экспериментального определения коэффициента теплоотдачи и коэффициентов теплопроводности шаровой стенки, таблицу опытных и расчетных данных, заключение о целесообразности использования слоя изоляционного материала.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Что такое температурное поле, изотермическая поверхность?
- 2 Что такое одномерное и многомерное температурные поля?
- 3 Дать определение стационарной и нестационарной теплопроводности.
- 4 Записать формулы для расчета термического сопротивления теплопроводности однослойной и многослойной шаровой стенки.
- 5 Что такое критический диаметр изоляции?
- 6 Закон Ньютона-Рихмана применительно к шаровой стенке?

## Литература

### Основная:

- 1 Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: Учебник- М.: Энергоиздат, 1981- 416 с.
- 2 Краснощеков Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче: Учебное пособие – М.: Энергия, 1980 – 288 с.
- 3 Практикум по теплопередаче / Солодов А.П., Цветков Ф.Ф., Елисеев А.В., Осипова В.А. – М.: Энергоатомиздат, 1986 – 296 с.
- 4 Тепломассообмен. Краткий конспект лекций / Тулебаева Ж.А. – Павлодар: изд-во «Кереку», 2007 – 54 с.
- 5 Теория тепломассообмена/Под редакцией А.И. Леонтьева. М.: Высшая школа, 1984. – 495 с.
- 6 Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена.- М.: Атомиздат, 1979.- 425 с.

### Дополнительная:

- 7 Темирбаев Д.Ж. Тепломассообмен: Решение задач с использованием ЭВМ. – Алматы: АИЭС, 2004. – 64 с.
- 8 Темирбаев Д.Ж. Тепломассообмен: Лабораторный практикум. – Алматы: АИЭС, 2003. – 44 с.
- 9 Юдаев Б.Н. Техническая термодинамика. Теплопередача. М.: Высшая школа, 1998. – 479 с.
- 10 Авчухов В.В., Паюсте Б.Я. Задачник по процессам тепломассообмена. Энергоиздат, 1986.- 144 с.
- 11 Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент. Справочник под общей редакцией В.А. Григорьева и В.М. Зорина. Энергоатомиздат, 1988.

## Содержание

Введение.....	3
.....	
Лабораторная работа №1. Определение коэффициента теплопроводности материала по методу цилиндрического слоя.....	4
Лабораторная работа №2 Исследование теплоотдачи при свободной конвекции в неограниченном объёме.....	1
	1
Лабораторная работа №3 Исследование теплоотдачи при вынужденном поперечном обтекании цилиндра.....	1
	8
Лабораторная работа № 4 Исследование распределения температур в сечении тел сложной формы на электрической модели .....	2
	5
Лабораторная работа № 5 Определение коэффициента теплопроводности методом шарового слоя.....	3
	2
Литература.....	4
.....	2



**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по УР

\_\_\_\_\_ Пфейфер Н.Э.

«\_\_»\_\_\_\_\_2010г.

Составитель: ст.преподаватель\_\_\_\_\_ Тулебаева Ж.А.

### **Кафедра теплоэнергетики**

Методические указания к лабораторным работам  
по дисциплине «Тепломассообмен»  
для студентов специальности 050717 «Теплоэнергетика»

Рекомендована на заседании кафедры, от «\_\_»\_\_\_\_\_2010г., протокол  
№\_\_

Заведующий кафедрой\_\_\_\_\_ Глазырин С.А.

Одобрена методическим советом энергетического факультета  
«\_\_»\_\_\_\_\_2010г., протокол №\_\_

Председатель МС \_\_\_\_\_ Кабдуалиева М.М.

Декан ЭФ \_\_\_\_\_Кислов А.П., «\_\_»\_\_\_\_\_2010г.

Нормоконтроль ОМК \_\_\_\_\_Баяхметова Г.С., «\_\_»\_\_\_\_\_2010г.

### **Одобрено ОП и МОУП**

Начальник ОП и МОУП \_\_\_\_\_Варакута А.А.

Министерство образования и науки Республики Казахстан

Павлодарский государственный университет  
им. С. Торайгырова

# **ТЕПЛОМАССООБМЕН**

Методические указания к лабораторным работам  
для студентов специальности 050717 "Теплоэнергетика"

Павлодар  
2010