

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра ЮНЕСКО “Энергосбережение и возобновляемые источники энергии”

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Лабораторные работы
для студентов специализации 1 43 010 6 01 "Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент в промышленности и коммунальном хозяйстве"
специальности 1 43 01 06 "Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент"

Учебное электронное издание

М и н с к 2 0 0 5

УДК 621.1.016.4 (076.5)

ББК 31.31я7

Л12

Составители:

Е.В. Кравченко, С.В. Климович

Рецензент П.Г.Кужир

Лабораторные работы по дисциплине «Теплопередача» для студентов специальности 1 43 01 06 "Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент" специализации 1– 43 010 6 01 "Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент в промышленности и коммунальном хозяйстве": учебное электронное издание / Сост. Е.В. Кравченко, С.В. Климович. – Мн.: БНТУ, 2005. – 54 с.

Цель лабораторных работ по курсу “Теплопередача”– научить будущих инженеров понимать физические процессы переноса теплоты и массы.

Учебное электронное издание составлено в соответствии с рабочей программой дисциплины “Теплопередача” для специальности 1 43 01 06 "Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент" специализации 1 43 01 06 01 "Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент в промышленности и коммунальном хозяйстве".

Рекомендовано методической комиссией факультета технологий управления гуманитаризации (протокол № 3 от 3 марта 2004).

В в е д е н и е

Дисциплина «Теплопередача» – одна из основных при подготовке специалистов в области энергоэффективных технологий и энергетического менеджмента – является базовой для последующего изучения специальных вопросов эффективного использования энергетических ресурсов в конкретных отраслях народного хозяйства.

Учебной программой дисциплины предусмотрено выполнение восьми лабораторных работ, охватывающих основные физические законы переноса теплоты и массы, их приложение к практическим инженерным задачам, методы исследования процессов теплообмена, роль теории подобия и методов моделирования в изучении этих процессов.

При выполнении лабораторных работ студенты используют знания и навыки, полученные при изучении курсов «Высшая математика», «Физика», «Гидрогазодинамика», «Техническая термодинамика».

Издание содержит общие сведения, описание экспериментальных установок, методический материал по выполнению работ и обработке результатов измерений.

[Содержание](#)

Л а б о р а т о р н а я р а б о т а №1 (Т П–0 0 1) ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПЛОСКОГО СЛОЯ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Цель работы

1. Определение коэффициента теплопроводности различных материалов методом плоского слоя в условиях стационарной теплопроводности.
2. Исследование влияния температуры на коэффициент теплопроводности.

Теоретические сведения

Перенос теплоты внутри тела, обусловленный тепловым движением микрочастиц (молекул, атомов, электронов) при наличии градиента температур и происходящий без макроскопических перемещений вещества, называется **теплопроводностью**.

Классическая теория теплопроводности рассматривает процесс распространения теплоты только с количественной стороны безотносительно к механизму процесса переноса [1].

Количество теплоты, проходящее в единицу времени через поверхность тела, называется **тепловым потоком** (обозначается Q). Под **плотностью** теплового потока понимается количество теплоты, проходящее в единицу времени через единицу площади поверхности (обозначается q).

На процесс распространения теплоты наряду с другими факторами влияют температура и форма тела. Это обстоятельство учитывается расчетными формулами, простейшей из которых является формула для расчета теплопроводности плоской стенки.

Плотность теплового потока для таких случаев определяется из уравнения

$$q = \lambda (T_{n1} - T_{n2}) / \delta, \text{ Вт/м}^2, \quad (1.1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м* К);

δ – толщина стенки, м;

T_{n1} и T_{n2} – температуры на ее поверхностях, °С.

Коэффициент теплопроводности является физическим параметром, который характеризует способность вещества проводить теплоту и численно равен плотности теплового потока при градиенте температуры, равном единице. Его величина зависит, прежде от рода вещества, а также температуры, плотности, влажности, структуры материала.

Наряду с теплопроводностью в газообразных и жидких средах имеет место конвективный, или молярный теплоперенос. Теплообмен, обусловленный совместным действием конвективного и молекулярного переноса теплоты, называется **конвективным теплообменом**. Частный случай конвективного теплообмена – **теплоотдача**, когда рассматривается теплообмен между поверхностью твердого тела и движущейся средой при их непосредственном соприкосновении.

При конвективном теплообмене для расчета плотности теплового потока пользуются формулой Ньютона – Рихмана

$$q = \alpha (T_n - T_c), \text{ Вт/ м}^2, \quad (1.2)$$

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

T_n, T_c – температуры поверхности тела и среды, °С.

Тепловой поток Q через заданную поверхность F определяется по формуле

$$Q = \alpha (T_n - T_c) F, \text{ Вт.} \quad (1.3)$$

Описание экспериментальной установки

Рабочий участок установки ([рис. 1.1](#)) состоит из двух образцов в виде тонкостенных дисков 1 толщиной $\delta = 5$ мм, диаметром $d = 140$ мм, которые располагаются между нагревателем 3 и холодильными камерами 2. Нагреватель фиксируется по центру теплоизоляционного кожуха 5, заполненного асбоцементом ($\lambda_k = 0,092$ Вт/(м· К)). Кожух высотой $h_k = 22$ мм состоит из двух симметричных полых цилиндров диаметром $d_k = 140$ мм. Электрическое сопротивление нагревателя $R = 41,7$ Ом.

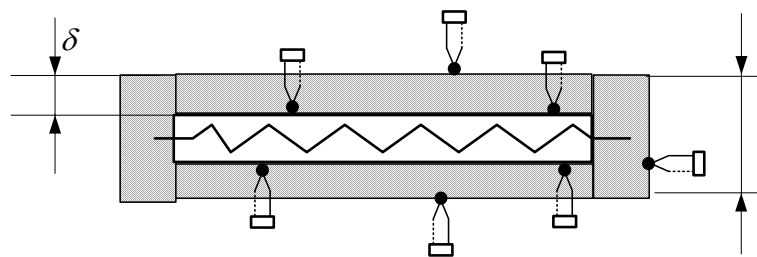


Рис. 1.1. Рабочий участок установки ТП-001

Для измерения температуры поверхностей образцов используются хромель-копелевые термопары ТХК. Термопары 1 – 1а и 2 – 1а зачеканены на внешней поверхности образцов со стороны холодильников. Термопары 3 – 1а, 6 – 1а, 4 – 1а и 5 – 1а расположены на внутренней поверхности образцов со стороны нагревателя (см. рис. 1.1). Для оценки температуры на внешней поверхности изоляционного кожуха установлена термопара 7 – 1а.

В реальной схеме (рис. 1.2) подаваемое на нагреватель напряжение регулируется автотрансформатором 8. Ток 9 и напряжение 10 измеряются комбинированным цифровым прибором. ЭДС термопар измеряется милливольтметром 11.

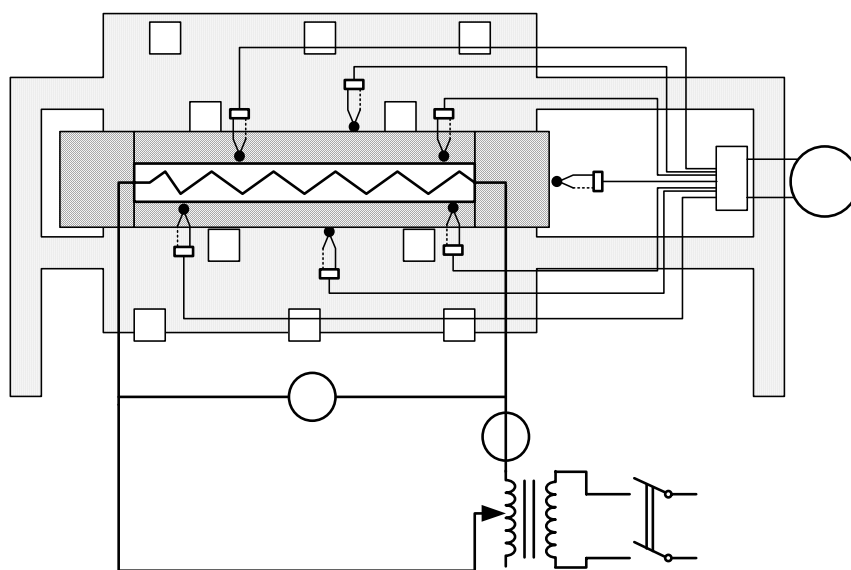


Рис. 1.2. Схема экспериментальной установки

Математическая модель установки, представленная в компьютерном варианте ([см. рис.1.3 Mmtp001k](#)), повторяет все перечисленные элементы реальной экспериментальной установки.

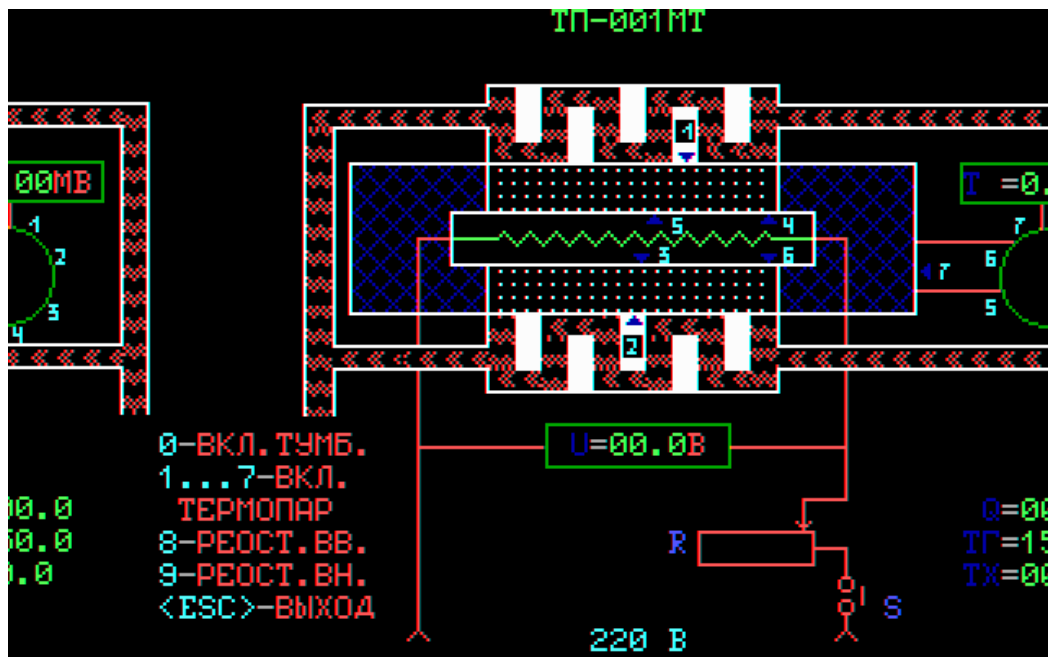


Рис. 1.3 Схема математического моделирования экспериментальной установки ТП-001MT

Методика расчета

Тепловой поток Q , Вт, на рабочем участке нагревателя определяется по формуле

$$Q = U^2 / R_s, \quad (1.4)$$

где U – напряжение, подаваемое на нагреватель установки, В;
 R – электрическое сопротивление нагревателя, Ом.

Заданный тепловой поток состоит из двух составляющих

$$Q = Q_\lambda + Q_\kappa, \quad (1.5)$$

где Q_λ – часть теплового потока, выделяемая в нагревателе, передаваемая через исследуемые образцы и уносимая охлаждающей водой, Вт;

Q_κ – часть теплового потока, выделяемая нагревателем, передаваемая через изоляционный кожух и теряемая в окружающую среду.

Составляющая Q_λ определяется исходя из уравнений переноса теплоты через плоскую стенку при граничных условиях I рода [1]

$$Q_\lambda = \lambda(T_{гор} - T_{хол}) 2F/\delta, \quad (1.6)$$

где λ – искомый коэффициент теплопроводности исследуемого материала;

δ – толщина пластины, равная 0,005 м;

$T_{гор}$ – средняя температура пластины со стороны нагревателя,

$$T_{гор} = (T_3 + T_4 + T_5 + T_6) / 4;$$

$T_{хол}$ – средняя температура пластины со стороны холодильника,

$$T_{хол} = (T_1 + T_2) / 2;$$

$F = \pi d^2 / 4$ – поверхность образца, м².

Радиальные тепловые потери определяются исходя из данной конструкции кожуха [3]

$$Q_{\kappa} = 0,163 (T_7 - T_c), \quad (1.7)$$

где T_c – температура окружающей среды, задаваемая в работе, К.

Полученные значения коэффициента теплопроводности следует относить к средней температуре исследуемого образца $T_{cp} = (T_{гор} + T_{хол}) / 2$.

Значения λ определяются для трех заданных режимов, затем строится зависимость λ в функции T_{cp} .

Порядок выполнения работы

Для проведения данной работы студент должен получить у преподавателя свой вариант исследований, ознакомиться с методикой проведения работы и методикой расчета.

Работа выполняется в следующей последовательности:

1. Для входа в программу нажать <Enter>.
2. Выбрать вариант проведения работы: основной – (клавиша <0>), приложение – (клавиша <1>).
3. В случае согласия нажмите <Y>, если нет – любую другую клавишу.
4. Задать температуру на горячей поверхности в пределах 40 – 125 °С, при согласии, нажимать <Y>. В результате появляется структурная схема установки.
5. Нажатием клавиши <0> замкнуть электрическую цепь и приступить к снятию показаний.
6. Установить в цепи напряжение $U = 40,5$ В, снять при этом значение теплового потока Q в Вт, температуры циркулирующей воды на входе ТГ и выходе ТХ в °С, показания термопар Т1 – Т7 в мВ.
7. С помощью реостата R (клавиши <8> и <9>) изменить напряжение в цепи от 40,5 до 90,1 В. Соответственно снять показания всех термопар, значения Q , ТГ, ТХ.
8. Данные измерений занести в [табл. 1.1](#).

Т а б л и ц а 1.1

№ п/п	U, В	Показания термопар, мВ							Q, Вт	T _г , °С	T _х , °С	T _с , °С
		1	2	3	4	5	6	7				
1												
2												
3												
4												
5												
6												

Обработка результатов измерений

Исходя из результатов измерений, приведенных в [табл. 1.1](#), выполняют следующие операции:

1. По градировочным таблицам ТХК (см. [приложение](#)) определяют все температуры с учетом температуры холодных спаев.

2. Рассчитывают конвективную составляющую Q_k согласно формулам ([1.1](#), [1.2](#), [1.3](#) и [1.4](#)).

3. Определяют составляющую Q_λ , учитывающую перенос теплоты за счет теплопроводности.

4. Рассчитывают среднюю температуру пластины со стороны нагревателя $T_{гор}$ и со стороны холодильника $T_{хо}$.

5. Используя выражения ([1.1...1.3](#)), рассчитывают коэффициент теплопроводности λ материала пластины для определенной температуры T . Расчет повторяют для другого теплового режима.

6. Строят график зависимости λ в функции средней температуры исследуемой пластины. По результатам вычислений определяют материал дисков.

[Содержание](#)

Лабораторная работа №2 (Т П-0 0 2) ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Цель работы

1. Исследование рекуперативного теплообменника при разных схемах включения и на различных режимах его работы.
2. Определение теплового потока, коэффициентов теплопередачи, тепловой эффективности и числа переноса единиц теплоты на каждом из режимов.

Теоретические сведения

Теплообменными аппаратами называются устройства, предназначенные для передачи теплоты от одной среды к другой. Разновидностью теплообменных аппаратов являются *рекуперативные теплообменники, или рекуператоры* [1].

В рекуператорах горячая и холодная среды с различными температурами текут в пространстве, разделенном стенкой. Теплообмен происходит за счет конвективной теплоотдачи, а если одна из сред является излучающим газом – то и за счет теплового излучения. Примером таких аппаратов являются парогенераторы, подогреватели, конденсаторы, выпарные аппараты и т.д. Режим работы таких аппаратов, в основном, стационарный.

Характер изменения температур рабочих сред на поверхности рекуперативного теплообменного аппарата зависит от схемы их движения. Наиболее простыми схемами движения являются: *прямоток*, *противоток* и *перекрестный ток*. Существуют аппараты и с более сложными схемами движения теплоносителя [2].

Расчет рекуператоров, работающих в стационарном режиме, ведется на основе уравнений теплового баланса и теплопередачи [2]. Уравнение теплового баланса имеет вид

$$Q = C_1 \delta T_1 = C_2 \delta T_2, \text{ Вт}, \quad (2.1)$$

где $C_1 = G_1 \cdot \bar{c}_{p1}$; $C_2 = G_2 \cdot \bar{c}_{p12}$ – расходные (полные) теплоемкости теплоносителей, Вт/К;

δT_1 и δT_2 – изменение температур горячего и холодного теплоносителей, $\delta T_1 = T_1' - T_1''$; $\delta T_2 = T_2'' - T_2'$.

Потерями теплоты в теплообменном аппарате пренебрегаем.

Отсюда можно заключить, что

$$\delta T_1 / \delta T_2 = C_2 / C_1, \quad (2.2)$$

т.е. изменение температур теплоносителей обратно пропорционально их расходным теплоемкостям.

Уравнение теплопередачи определяет количество теплоты dQ , передаваемой через заданную элементарную поверхность dF в единицу времени, если заданы температуры греющего T_1 и нагреваемого T_2 теплоносителей [1]:

$$dQ = k (T_1 - T_2) dF, \quad (2.3)$$

где k – коэффициент теплопередачи от одного теплоносителя к другому, Вт/(м²·К).

Коэффициент теплопередачи характеризует интенсивность передачи теплоты от одной среды к другой через разделяющую их стенку. Он численно равен количеству теплоты, проходящей через единицу поверхности стенки в единицу времени при разности температур между средами в один градус.

Если $k = const$, то

$$Q = k \cdot (\bar{T}_1 - \bar{T}_2) \cdot F = k \cdot \Delta \bar{T} \cdot F, \quad (2.4)$$

где $\Delta \bar{T}$ – среднелогарифмический температурный напор, определяемый выражением [2]:

$$\Delta \bar{T} = \frac{\Delta T_{\bar{6}} - \Delta T_{\bar{м}}}{\ln \frac{\Delta T_{\bar{6}}}{\Delta T_{\bar{м}}}}, \quad (2.5)$$

где $\Delta T_{\bar{6}}$ и $\Delta T_{\bar{м}}$ – наибольший и наименьший температурные напоры на входе и выходе из теплообменников [2].

Если $\Delta T_{\bar{}}/\Delta T_m < 2$, вместо среднелогарифмического температурного напора можно использовать его среднеарифметическое значение

$$\Delta \bar{T} = \frac{\Delta T_{\bar{}} + \Delta T_m}{2} \quad (2.6)$$

Описание экспериментальной установки

Изучение процесса теплопередачи и тепловой эффективности теплообменника проводится на моделирующей установке, схема которой представлена на [рис. 2.1](#) (электронный вариант TP014MT).

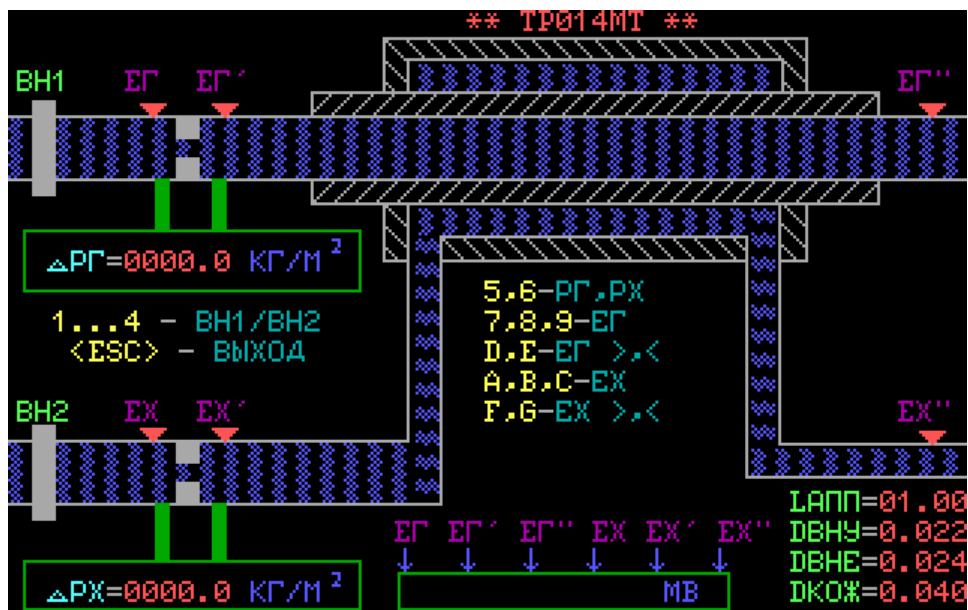


Рис. 2.1 Схема математического моделирования экспериментальной установки

Рабочий элемент установки – рекуператор типа «труба в трубе» – состоит из внутренней трубы $d_{вн}$ с толщиной стенки 1 мм, по которой движется греющий теплоноситель, и концентрично расположенной наружной трубы с внутренним диаметром кожуха $d_{кож}$, где движется нагреваемый теплоноситель. В качестве теплоносителей используются воздух и вода. Диаметры внутренней и наружной труб, длина трубы, по которой подсчитывается поверхность теплообмена, изменяются в широких пределах ([см. табл. 2.1](#)).

Т а б л и ц а 2.1

Варианты исходных параметров

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$D_{вн} 10^3, \text{м}$	6	8	10	12	14	16	18	20	22
$D_{нар} 10^3, \text{м}$	8	10	12	14	16	18	20	22	24
$D_{кож} 10^3, \text{м}$	10	16	20	22	24	28	32	36	40
A $L_{тр.}, \text{м}$	0,5	1,0	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5
Б $L_{тр.}, \text{м}$	0,8	1,25	1,75	2,5	5	4,5	4	3,5	3

Исходные данные задаются преподавателем. С помощью программы устанавливается расход горячего теплоносителя на входе и считывают с монитора значения P_2 или ΔP_2 . Аналогично устанавливается расход холодного теплоносителя P_x или ΔP_x . Для регулирования расхода теплоносителей используются вентили ВН1 и ВН2; для измерения расхода предназначены диафрагмы, перепад давления в которых регистрируется с помощью мембранных дифференциальных манометров. Для измерения температур на входе и выходе в ТА используются хромель–копелевые термопары, которые поочередно подключаются к определенным участкам установки.

Порядок выполнения работы

Для выполнения данной работы студент должен получить у преподавателя свой вариант исследований: исходные геометрические данные аппарата (см. табл. 2.1), виды теплоносителей, предлагаемую схему движения сред (прямоток – противоток), наличие турбулизующей решетки.

Работа выполняется в следующей последовательности:

1. Для входа в программу нажать $\langle \text{Enter} \rangle$.
2. Задать внутренний диаметр трубы, по которой движется горячий теплоноситель $d_{\text{вн}}$.
3. В случае согласия нажать $\langle Y \rangle$, если нет – любую другую клавишу.
4. Задать наружный диаметр трубы $d_{\text{нар}}$ по данному теплоносителю в соответствии с вариантом.
5. Принять внутренний диаметр кожуха $d_{\text{кож}}$.
6. Задать длину аппарата, при согласии нажать клавишу $\langle Y \rangle$.
7. Установить схему движения теплоносителей (прямоток – клавиша $\langle 0 \rangle$, противоток – клавиша $\langle Y \rangle$).
8. Выбрать вид горячего теплоносителя (клавиша $\langle 1 \rangle$ – вода, $\langle 0 \rangle$ – воздух).
9. Выбрать вид холодного теплоносителя (клавиши те же: воздух или вода).
10. Выбрать схему с турбулизатором (клавиша $\langle 1 \rangle$) или без него (клавиша $\langle 0 \rangle$).
11. При наличии турбулизующей решетки задать диаметр кольцевых диафрагм, диаметр кольцевых каналов и шаг кольцевых диафрагм.
12. С вводом вышеперечисленных параметров на мониторе появляется структурная схема рекуперативного теплообменника; теперь можно приступить к исследованию теплопередачи в ТА.
13. Нажатием на клавишу $\langle 1 \rangle$ открыть подачу горячего теплоносителя по внутренней трубе и установить расход P_G в $\text{кг}/\text{м}^2$, нажатием на клавишу $\langle 3 \rangle$ открыть подачу холодного теплоносителя, одновременно задать расходы P_X в $\text{кг}/\text{м}^2$.
14. Используя клавиши $\langle 5 \rangle$ и $\langle 6 \rangle$, определить перепады давлений на диафрагмах ΔP_r и ΔP_x .
15. Нажимая клавиши $\langle 7 \rangle$, $\langle 8 \rangle$ и $\langle 9 \rangle$, определяют температуры в точках ЕГ, ЕГ и ЕГ по горячему теплоносителю; нажимая клавиши $\langle A \rangle$, $\langle B \rangle$ и

$\langle C \rangle$ – температуры по холодному теплоносителю в точках EX, EX И EX в мВ.

16. Температуры теплоносителей на входе и выходе из аппарата устанавливаются клавишами $\langle D \rangle$, $\langle E \rangle$ и $\langle F \rangle$, $\langle G \rangle$.

Результаты измерений вносятся в [табл. 2.2](#).

Т а б л и ц а 2.2

Схема включения	Теплоноситель		Температура воды, мВ/°С		Температура воздуха, мВ/°С		Температура на входе, мВ /°С		Давление теплоносителя, кг/м ²		Перепады давлений на диафрагмах, кг/м ²	
	Гор.	Холод.	Вход, E ₂	Выход, E ₂	Вход, E _x	Выход, E _x	E ₂	E _x	P ₂	P _x	ΔP ₂	ΔP _x
Прямоток												
Противоток												

Обработка результатов измерений

Исходя из полученных результатов измерений ([см. табл. 2.2](#)) выполняем следующие операции:

1. По градуировочным таблицам хромель-копелевых термопар ([см. приложение](#)) определяют все температуры с учетом температуры холодных спаев.

2. Вычисляют значения среднего температурного напора при противотоке или прямотоке по формулам (2.5) или (2.6).

3. Определяют массовые расходы горячего G₂ и холодного G_x теплоносителей в функции перепада давлений на диафрагмах ΔP₂ и ΔP_x; значения этих величин определяют по тарировочным кривым, приведенным в приложении. Данные, найденные в п. 1 и 3, заносят в [табл. 2.3](#).

Т а б л и ц а 2.3

№ п/п	T ₁ ', К	T ₂ '', К	T ₂ ', К	T ₂ '', К	G ₂ , кг/с	G _x , кг/с

4. При использовании воздуха в качестве теплоносителя расход определяют по формуле

$$G_{\text{взд}} = 0,472 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\rho_g \Delta P_{\text{взд}}}, \text{ кг/с}, \quad (2.7)$$

где ρ_B – плотность воздуха перед диафрагмой, кг/м³;
 $\Delta P_{взд}$ – перепад давления на диафрагме, кг/м³.

5. При использовании воды в качестве теплоносителя расход определяют по формуле

$$G_{ГХ} = 0,0723 \cdot \sqrt{\Delta P_{ГХ}}, \text{ кг/с}, \quad (2.8)$$

где $\Delta P_{ГХ}$ – перепад давлений горячего или холодного теплоносителя на диафрагме, кг/м³.

Исходя из расчетных данных проводят дальнейшие расчеты, изложенные в п. 4 – 10:

1. Вычисляют тепловой поток Q , выделяемый горячим теплоносителем и полученный холодным из уравнения теплового баланса (2.1).

2. Определяют значения коэффициента теплопередачи k для каждого из режимов из уравнения теплопередачи (2.4)

$$k = Q / F \Delta T, \text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{К)}, \quad (2.9)$$

где F – расчетная поверхность теплообмена,

$$F = \pi [(d_{вн} + d_{нар}) / 2] L. \quad (2.10)$$

3. Определяют значения величин C_1 и C_2 по формулам

$$C_1 = G_1 \cdot \overline{C}_{p1}; \quad C_2 = G_2 \cdot \overline{C}_{p12}, \text{ Вт/К}, \quad (2.11)$$

где $\overline{C}_{p1} = 4,186$ кДж/(кг К) – средняя теплоемкость воды;

$\overline{C}_{p12} = 1,005$ кДж/(кг К) – средняя теплоемкость воздуха.

Используя расчетные данные и другие результаты, определяют, как влияет схема включения ТА на величину ΔT ; как влияет расход теплоносителя на значения k и ΔT .

Полученные экспериментальным путем численные значения коэффициентов теплопередачи сравнивают для прямоточной и противоточной схем. Поясняют преимущество противоточной схемы по сравнению с прямоточной и делают вывод о целесообразности применения того или иного теплообменника.

[Содержание](#)

Лабораторная работа №3 (Т П – 0 0 3)
ИЗУЧЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ ОКОЛО
ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЦИЛИНДРА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ
ПРОЦЕССА ТЕПЛОТДАЧИ

Цель работы

1. Определение коэффициентов теплоотдачи на поверхности горизонтальной трубы в условиях естественной конвекции.
2. Определение коэффициента теплоотдачи по периметру цилиндра.
3. Обобщение результатов опыта.

Теоретические сведения

Свободная движение (конвекция) – это движение среды (воздуха, жидкости), возникающее за счет того, что в неравномерно нагретой среде разность температур приводит к неравномерному распределению плотности. Следовательно, неравномерным условием возникновения такого движения является разность плотностей холодной и нагретой части среды (воздуха, жидкости).

Процесс теплообмена между поверхностью твердого тела и средой называется **теплоотдачей**, а поверхность тела, через которую переносится теплота – **поверхностью теплообмена**, или **теплоотдающей поверхностью**.

Согласно закону Ньютона-Рихмана, тепловой поток в процессе теплоотдачи пропорционален площади поверхности теплообмена F и разности температур поверхности T_n и среды T_c :

$$Q = \alpha \cdot (T_n - T_c) \cdot F, \text{ Вт}, \quad (3.1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);
 T_n – температура поверхности, К;
 T_c – температура среды вдали от стенки, К;
 F – поверхность тела (стенки), м².

Коэффициент теплоотдачи α , входящий в формулу (3.1), характеризует интенсивность процесса теплоотдачи и определяется экспериментально. Сего помощью измеряют тепловой поток Q при температурном напоре $\Delta T = (T_n - T_c)$ в процессе теплоотдачи известной площади F , (м²). Затем по формуле (3.1) определяют α .

На основании экспериментальных исследований конвективного теплообмена между различными телами и средами в условиях свободного движения получено следующее уравнение подобия:

$$Nu_m = C(GrPr)_m^n, \quad (3.2)$$

где C, n – постоянные, зависящие от формы и расположения тел в пространстве.

В приведенном критериальном уравнении $Nu = \alpha d/\lambda$ (критерий Нуссельта);

$Gr=(gd^3 \beta / \nu^2) \Delta t$ – (критерий Грасгофа); $Pr=\nu / \alpha$ – (критерий Прандтля).

В практике расчетов используют критерий Рейля: $Ra=Gr_m Pr_m$.

Описание экспериментальной установки

На [рис. 3.1](#) показан общий вид экспериментальной установки с указанием органов измерения и регулировки.

Съемный рабочий участок E экспериментальной установки ([рис. 3.2](#)) представляет собой горизонтально расположенную тонкостенную трубу из нержавеющей стали, изготовленную с различными параметрами ([см. табл. 3.1](#)).

Внутри трубы установлен электрический нагреватель 5, в цепь которого включены амперметр 3 и вольтметр 4. Нагрев регулируется лабораторным автотрансформатором 1. Торцы трубы теплоизолированы.

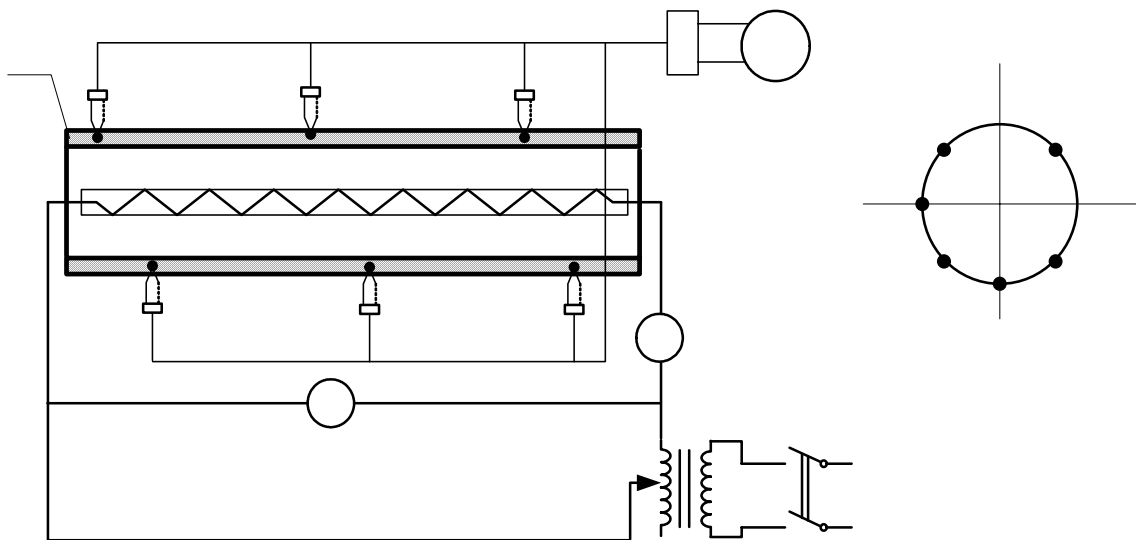


Рис. 3.1. Схема экспериментальной установки

В поверхность трубы заделаны 6 термопар ТХК, свободные концы которых выведены на разъем. Холодные спаи термопар должны быть помещены в термостат.

На [рис. 3.2](#) приведена схема измерений. ТермоЭДС термопар 2а измеряется милливольтметром 2в, соединенным с термопарами через переключатель 2б. Температура окружающей среды измеряется лабораторным термометром.

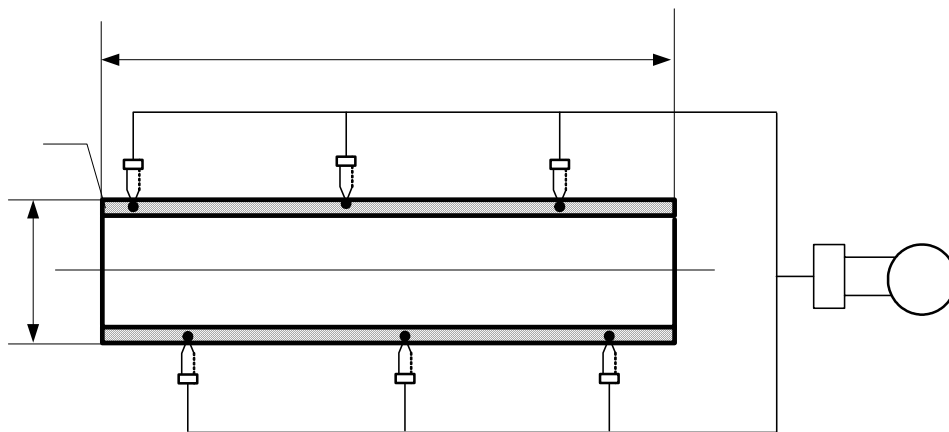
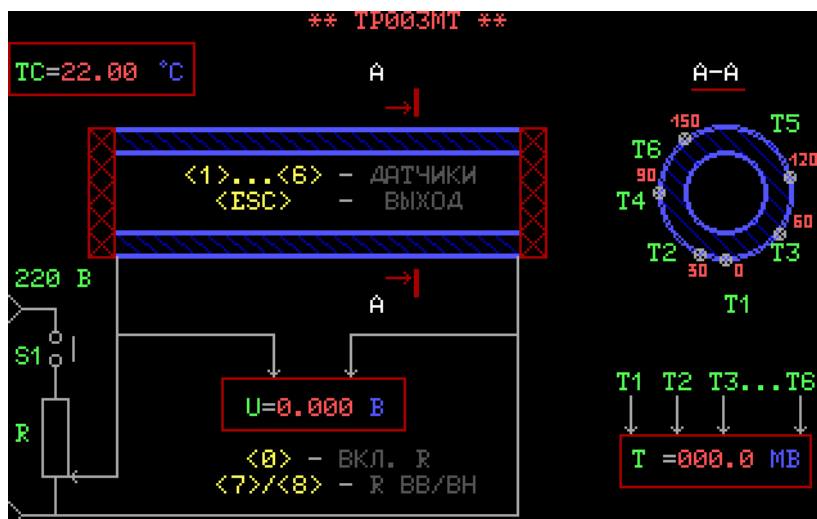


Рис. 3.2. Схема измерений

Математическая модель установки, представленная в компьютерном варианте (см. рис 3.3 Mmtp003MT), повторяет все перечисленные элементы реальной экспериментальной установки.

E



T5

Рис. 3.3 Схема математического моделирования экспериментальной установки ТП– 003MT

T2

Методика расчета

В случае естественной конвекции около горизонтального цилиндра с постоянной температурой критериальное уравнение имеет вид

$$Nu_m = C(GrPr)^n_m, \quad (3.3)$$

где $Nu = \alpha d / \lambda$ – критерий Нусельта;

$Gr = (gd^3 \beta / \nu^2) \Delta t$ – критерий Грасгофа;

$Pr = \nu / \alpha$ – критерий Прандтля;

где ν – кинематическая вязкость, m^2/c ;

α – температуропроводность воздуха m^2/c ;

λ – теплопроводность, Вт/(м·К);
 d – наружный диаметр цилиндра, м;
 $g = 9,81$ – ускорение свободного падения, м²/с;
 $\beta = 1/(t+273)$ – коэффициент объемного расширения, К⁻¹.

Индекс m в уравнении (3.3) означает, что физические параметры, входящие в критерий подобия, находятся при средней температуре пограничного слоя

$$t_m = (t_{cm} + t_{oc}) / 2 ,$$

где t_{cm} – температура поверхности цилиндра, °С;
 t_{oc} – температура воздуха в помещении °С.

Постоянные C и n определяются из эксперимента следующим образом. В логарифмических координатах зависимость (3.3) представляет собой прямую (рис. 3.4)

$$\log Nu_m = \log C + n \log (GrPr)_m .$$

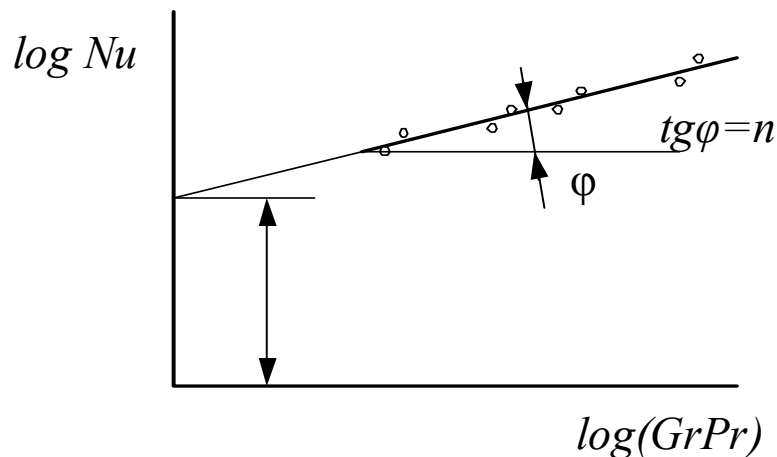


Рис. 3.4. Зависимость $Nu = C(Gr Pr)^n$ в логарифмических координатах

В зависимости $Nu = C(Gr Pr)^n$ в логарифмических координатах с угловым коэффициентом, равным показателю степени n , постоянная C представляет собой отрезок, получающийся при пересечении прямой с осью ординат (см. рис. 3.3). В результате обобщения многочисленных экспериментальных данных в диапазоне изменения аргумента $5 \cdot 10^2 \leq (Gr Pr)_m \leq 2 \cdot 10^7$ для рассматриваемого случая получены следующие значения постоянных: $C = 0,54$; $n = 0,25$.

Обработка результатов измерений

Для представления полученных экспериментальных данных в форме зависимости (3.1) выполняют следующие действия:

1 Определяют коэффициент теплоотдачи α (Вт/(м²·К)) по формуле Ньютона (3.1)

$$\alpha = Q / (t_{cm} - t_{oc}) , \tag{3.4}$$

где Q – тепловой поток, направленный по нормали, от поверхности цилиндра в окружающую среду, Вт.

При принятой в настоящей работе схеме нагрева цилиндра тепловой поток является постоянным (за исключением участков, прилегающих к теплоизолированным торцам трубы) и на большей части рабочего участка направлен по нормали к его поверхности, поэтому при осреднении температуры поверхности цилиндра, показания крайних термопар не учитываются.

Тепловой поток Q определяется по электрической мощности, затрачиваемой на нагревание рабочего участка электрическим нагревателем:

$$Q = U^2/R = UI, \quad (3.5)$$

где U – напряжение на электрическом нагревателе, В;

I – сила тока на электрическом нагревателе, А;

R – электрическое сопротивление рабочего участка, Ом.

Вычисленный коэффициент теплоотдачи является суммарным, так как теплота с поверхности цилиндра отдается не только естественной конвекцией, но и излучением: $\alpha = \alpha_k + \alpha_l$.

Коэффициент теплоотдачи излучением определяется расчетным путем:

$$\alpha_l = \varepsilon \cdot 5,67 \cdot \frac{(T_{cm}/100)^4 - (T_{жс}/100)^4}{t_{cm} - t_{oc}}, \quad (3.6)$$

где $\varepsilon = 0,6$ – степень черноты поверхности;

t_{cm} , t_{oc} – термодинамические температуры поверхности цилиндра и окружающей среды, К.

2. Подсчитывают значения коэффициента теплоотдачи за счет свободной конвекции $\alpha_k = \alpha - \alpha_l$.

3. Подсчитывают значения критериев Nu_m и $(GrPr)_m$ и их логарифмы для трех режимов.

4. Строят в логарифмических координатах зависимость $Nu_m = 0,54(GrPr)^{0,25}_m$ и наносят на график полученные экспериментальные данные.

Порядок выполнения работы

Прежде чем приступить к выполнению работы, необходимо получить у преподавателя свой вариант исследования ([см. табл. 3.1](#)), ознакомиться с общими сведениями и методикой расчета, получить допуск к работе.

Работа выполняется в следующей последовательности:

1. Для входа в программу нажать < Enter >;
2. Установить, согласовав с преподавателем, свой вариант исследования по табл. 3.1.

Варианты исходных параметров

№ варианта	1	2	3	4	5	6
Длина трубы, м	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Диаметр трубы, мм	20	25	32	38	44	50
Толщина стенки, мм	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0

3. Привести структурную схему установки в рабочее состояние.
4. Задав падение напряжения $\langle U \rangle$ с помощью реостата $\langle R \rangle$, снять показания всех термопар, установленных на поверхности трубы.
5. Повторить измерения температур при других тепловых режимах.
6. По градуировочным таблицам хромель-копелевых термопар ([см. приложение](#)) определить все температуры с учетом температуры холодных спаев. Данные изменения внести в [табл. 3.2](#).

№п/п	Напряжение $U, В$	Показания термопар, °С						$t_{oc}, °С$
		1	2	3	4	5	6	
1								
2								
3								

[Содержание](#)

Лабораторная работа №4 (Т П-0 0 4)
ИССЛЕДОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ У НАГРЕТОЙ
ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТЕНКИ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ

Цель работы

1. Определение локальных коэффициентов теплоотдачи на поверхность вертикальной трубы в условиях естественной конвекции.
2. Обобщение результатов опытов и представление их в виде критериальной форме.

Теоретические сведения

Свободное движение (конвекция) возникает под действием разности плотностей в неравномерно нагретой среде (воздух, жидкость). Следовательно, непременным условием для возникновения и развития такого движения является наличие разности температур между поверхностью исследуемого объекта и окружающей среды [1].

Применительно к вертикальному цилиндру (стенке), когда процесс развивается в неограниченном пространстве, в образующемся пограничном

слое наблюдаются 3 режима движения среды (см. программу Mtp): на нижнем участке (а) устанавливается **ламинарный режим**, который переходит в **промежуточный (б) – локонообразный** и, наконец, в **турбулентный – (вихревой) (с)**. Переход одного режима в другой обусловлен температурным напором на данном участке и расстоянием по высоте трубы [2].

С изменением характера движения среды изменяется и теплоотдача. На начальном участке поверхности вследствие увеличения толщины пограничного слоя термическое сопротивление возрастает, благодаря чему коэффициент теплоотдачи по направлению движения убывает. На некоторой высоте ламинарный слой начинает разрушаться и переходит в турбулентный с ламинарным подслоем. Соответственно изменяется и коэффициент теплоотдачи. Интенсивность теплоотдачи в общем виде зависит от рода жидкости, ее теплофизических свойств, температурного напора, размеров и формы тела, ориентации тел в пространстве и т.д.

Описание экспериментальной установки

На [рис. 4.1](#) показан общий вид экспериментальной установки с указанием органов измерения и регулировки.

Внутри вертикальной трубы установлен электрический нагреватель 5, в электрическую цепь подключения которого включены амперметр 3 и вольтметр 4. Количество тепла, подведенного на нагрев, регулируется лабораторным автотрансформатором 2. Торцы закрыты заглушками для устранения отвода теплоты через внутреннее пространство трубы.

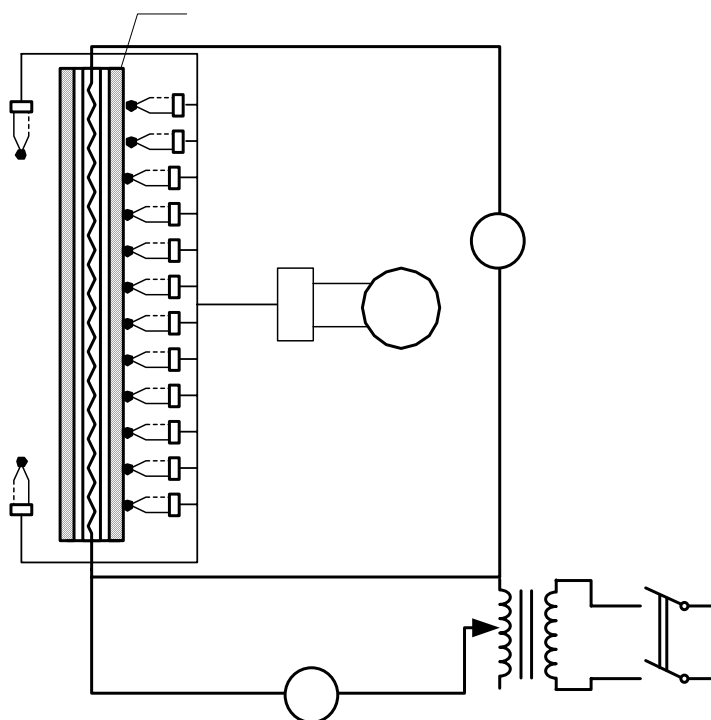


Рис. 4.1. Схема экспериментальной установки

Рабочий участок установки *E* ([рис.4.2](#)) представляет собой тонкостенную трубу из нержавеющей стали 12Х18Н10Т с наружным диаметром $d = (40 \pm 0,1)$ мм и длиной $l = (1600 \pm 5)$ мм, расположенную вертикально. Схема измерений показана на [рис.4.2](#).

Температура стенки трубы измеряется с помощью 12 хромель-копелевых термопар (ТХК), спаи которых заделаны в стенку трубы по винтовой линии. Отсчет номеров термопар принят от нижнего конца трубы. Вывод термопар осуществлен через внутреннюю полость трубы и далее – через верхний торец. Координаты термопар от нижнего конца трубы l_i приведены на [рис. 4.2](#). Вблизи наружной стенки трубы на расстоянии 400 мм друг от друга по вертикали установлены две передвижные термопары 13–1а и 14–1а для измерения температуры воздуха в пристеночном слое.

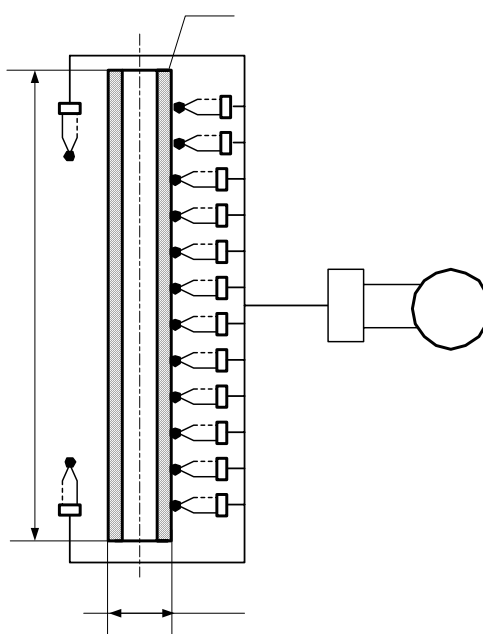


Рис. 4.2. Схема измерений

Температуры регистрируются милливольтметром 1 в. Термопары соединяются с милливольтметром через многопозиционный переключатель 1б. Холодные спаи термопар должны быть помещены в термостат. Температура окружающего воздуха измеряется ртутным термометром.

Математическая модель установки, представленная в компьютерном варианте ([см. рис. 4.3 Mmtp004MT](#)), повторяет все перечисленные элементы реальной экспериментальной установки.

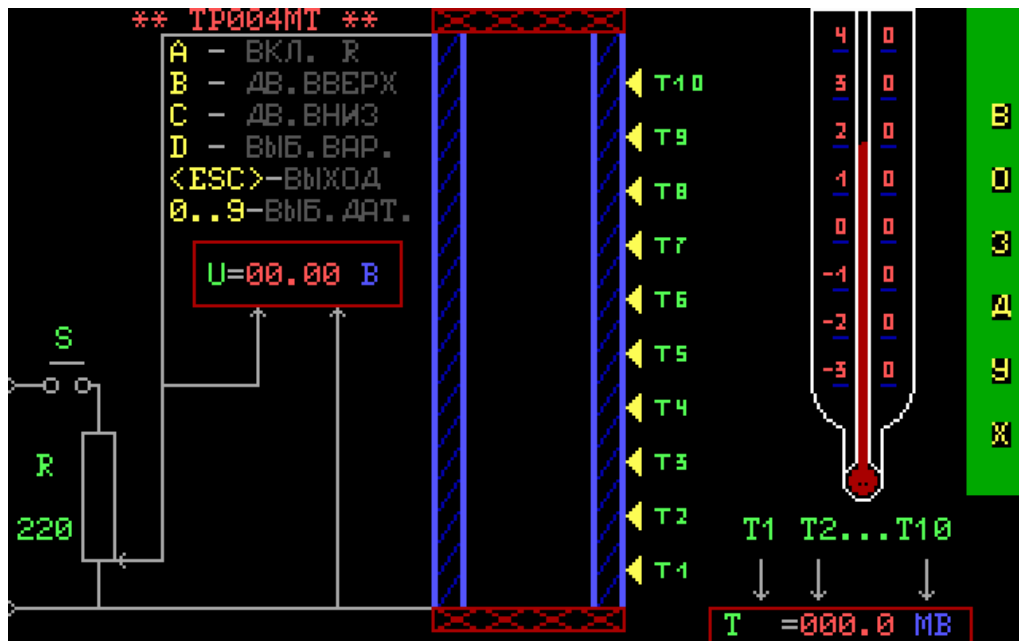


Рис. 4.3 Схема математического моделирования экспериментальной установки ТП– 004МТ

Методика расчета

Для представления полученных экспериментальных данных в критериальной форме и определения показателя степени n и постоянной C необходимо определить электрическую мощность, подведенную к рабочему участку для нагрева, по формуле

$$q = N = U^2 / R = UI, \text{ Вт}, \quad (4.1)$$

где R – электрическое сопротивление стального цилиндра, равное 0,0195 Ом;

I – электрический ток, А;

U – электрическое напряжение тока, В.

Тепловой поток Q , выделяемый в нагревателе рабочего устройства, состоит из двух составляющих:

$$Q = Q_k + Q_l, \text{ Вт}, \quad (4.2)$$

где Q_k – тепловой поток, передаваемый за счет свободной конвекции, Вт;

Q_l – тепловой поток, передаваемый тепловым излучением, Вт.

Тепловой поток, передаваемый за счет теплового излучения, находится из уравнения Стефана – Больцмана [1]:

$$Q_l = C_o \varepsilon \cdot F [(T_n / 100)^4 - (T_c / 100)^4], \text{ Вт}, \quad (4.3)$$

где $\varepsilon = 0,15$ – степень черноты поверхности трубы;

$C_o = 5,67 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \text{ К}^4)$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

$F = \pi d L$ – площадь боковой поверхности трубы, м²;
 $T_{\text{п}}$ – средняя температура стенки, К;
 T_c – температура окружающей среды, К.

Затем определяется средняя температура стенки трубы по формуле

$$\frac{1}{t_{cm}} = \frac{(\sum t_{cmi})^{12}}{12} \quad (4.4)$$

Конвективная составляющая Q_k , Вт, определяется из уравнения

$$Q_k = Q - Q_l, \quad (4.5)$$

где Q_l – лучистый тепловой поток, рассчитываемый по формуле

Средний коэффициент теплоотдачи α_k находится из уравнения Ньютона – Рихмана [1]

$$\alpha_k = Q_k / F \Delta T, \text{ Вт/ (м}^2 \cdot \text{К)}, \quad (4.6)$$

где $\Delta T = T_n - T_c$ – температурный напор, К.

Для определения локальных коэффициентов теплоотдачи по высоте трубы используется уравнение

$$\alpha_{ki} = Q_{ki} / (\pi l_i d \Delta T_i), \text{ Вт/ (м}^2 \cdot \text{К)}, \quad (4.7)$$

где $\Delta T_i = T_{\text{п}i} - T_c$ – температурный напор в местах заделки термопар по высоте трубы l_i , К.

Результаты экспериментального исследования теплоотдачи при естественной конвекции на поверхности вертикального цилиндра, как и в случае горизонтального цилиндра, могут быть представлены критериальным уравнением

$$Nu_m = C(GrPr)_m^n. \quad (4.8)$$

Вычисляются значения критериев:

Нусельта $Nu_m = \alpha_i d / \lambda_m \quad (4.9)$

Грасгофа $Gr_m = (g l^3 \beta_m / \nu_m^2) \Delta t_i \quad (4.10)$

Релея $Ra_m = Gr_m Pr_m \quad (4.11)$

где ν – кинематическая вязкость, м²/с;

α – температуропроводность воздуха, м²/с;

λ – теплопроводность, Вт/(м·К);

d – наружный диаметр цилиндра, м;

l – длина цилиндра, м;

$g = 9,81$ – ускорение свободного падения, м²/с;

$\beta = 1/(t+273)$ – коэффициент объемного расширения, К⁻¹.

Термофизические коэффициенты, входящие в перечисленные критерии подобия, выбираются из таблиц при средней определяющей температуре

$t_m = (t_{cm} + t_{жс}) / 2$, где t_{cm} – среднее значение температуры стенки, К. В качестве определяющего размера принята высота цилиндра L .

Порядок выполнения работы

Прежде чем приступить к выполнению работы, необходимо выяснить у преподавателя свой вариант исследования, ознакомиться с общими сведениями и методикой расчета, получить допуск к работе.

Работа выполняется в следующей последовательности:

1. Для входа в программу нажать <Enter>.
2. Выбрать вариант исследования.
3. Привести структурную схему установки в рабочее состояние.
4. Установить в цепи исходное напряжение U с помощью реостата R и снять при данной нагрузке показания всех термопар.
5. Повторить исследование при других значениях напряжения U , меняя положение реостата.
6. Занести данные измерений в [табл. 4.1](#).

Т а б л и ц а 4.1

№ п/п	$U, В$	Показания термопар ^о С										Род газа
		t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	

7. Результаты измерений повторить при 3-4 различных режимах.
8. По градуировочным таблицам хромель-копелевых термопар ([см. приложение](#)) определить все температуры с учетом температуры холодных спаев.

Расположение термопар по высоте трубы приведено в таблице 4.2.

Т а б л и ц а 4.2

Расположение термопар по высоте трубы

Термопара	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}
Высота цилиндра $l_i, мм$	60	90	130	170	210	310	560	860	1160	1460

Обработка результатов измерений

Исходя из результатов проведенных измерений выполняют следующие операции:

1. Определяют электрическую мощность, подведенную к рабочему участку, по формуле (4.1).
2. Находят лучистую составляющую теплового потока по формуле (4.3).
3. Вычисляют конвективную составляющую теплового потока Q_k от стенки трубы по формуле (4.2).
4. Рассчитывают среднюю температуру стенки трубы по формуле (4.4).
5. Определяют средний коэффициент конвективной теплоотдачи по формуле (4.6).
6. Подсчитывают локальные значения коэффициентов теплоотдачи по высоте трубы по формуле (4.7).
7. Данные расчетов заносят в [табл. 4.3](#) и [табл. 4.4](#)

Т а б л и ц а 4.3

№п/п	Тепловой поток Q , Вт	Лучистый Q_l , Вт	Конвективный Q_k , Вт	Температурный напор ΔT_i , К	Средний коэффициент теплоотдачи α_k	Термопары по высоте трубы l_i

Т а б л и ц а 4.4

№п/п	Термопары по высоте трубы l_i	Средний коэффициент теплоотдачи α_k	Критерий Грасгофа Gr_m	Критерий Нусельта Nu_m	Критерий Релея Ra_m

8. Для представления полученных экспериментальных данных в критериальной форме и определения показателя степени n и постоянной C в критериальном уравнении (4.8) находят значение определяющей температуры по формуле $t_m = (t_{cm} + t_{жс}) / 2$.

9. По найденному значению определяющей температуры выписывают из таблиц значения теплофизических коэффициентов (λ , ν , Pr) и подсчитывают значение объемного коэффициента расширения $\beta = 1 / (t_m + 273)$.

10. Вычисляют значения критериев Грасгофа, Прандтля, Нуссельта. Полученные значения критериев подобия наносят на график, построенный в логарифмической системе координат $lg Nu_m$, $lg(GrPr)_m$, и аппроксимируют экспериментальные точки линейной зависимостью.

11. Определяют постоянные n и C , входящие в критериальное уравнение, и сравнивают их с имеющимися в литературе данными.

[Содержание](#)

Лабораторная работа №5 (Т П – 0 0 5)

ТЕПЛОТДАЧА ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ДВИЖЕНИИ ВОЗДУХА В ТРУБЕ

Цель работы

1. Определение локальных и среднего значений коэффициента теплоотдачи при движении воздуха в трубе.
2. Исследование влияния скорости воздуха на коэффициент теплоотдачи α .
3. Оценка длины участка тепловой стабилизации исходя из экспериментальных данных.

Теоретические сведения

Конвективный теплообмен, возникающий под действием внешних сил, называется *вынужденной конвекцией*.

При малых скоростях движения жидкости и больших перепадах температур теплота переносится за счет как естественной, так и вынужденной конвекции. В случае, если скорости движения теплоносителя достаточно велики, а температурные перепады незначительны, влиянием свободной конвекции на суммарный теплообмен можно пренебречь.

Интенсивность теплоотдачи конвекцией зависит от характера течения жидкости в пограничном слое. Различают режимы: *устойчивый ламинарный* ($Re < 2 \cdot 10^3$), *переходной* ($2 \cdot 10^3 < Re < 10^4$) и *развитый турбулентный* ($Re > 10^4$).

При ламинарном режиме течения жидкости, когда линии тока параллельны теплоотдающей поверхности, интенсивность теплообмена невелика, слабо зависит от скорости потока, но сильно изменяется при изменении теплофизических свойств теплоносителя.

При турбулентном режиме течения жидкости возникает интенсивное поперечное перемещение теплоносителя, что вызывает интенсивный теплообмен на теплоотдающей поверхности.

При вынужденном режиме стабилизированное течение, т.е. вполне определенное распределение скорости и температуры, имеет место на достаточном удалении от входа. На этом участке теплоотдача зависит от скорости, диаметра трубы и физических свойств теплоносителя. На начальном участке, где имеет место нестабилизированное течение, процесс теплоотдачи отличается большой сложностью, и коэффициент теплоотдачи α резко изменяется по длине трубы.

Обобщение большого числа опытных данных дает следующую критериальную зависимость для расчета коэффициента теплоотдачи α от стенки трубы к текущему в ней теплоносителю на участке стабилизированного течения:

$$Nu_{жс} = 0,021 \cdot Re_{жс}^{0,68} \cdot Pr_{жс}^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25} \quad (5.1)$$

При вынужденном турбулентном течении воздуха в трубе поправкой $\left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25}$ можно пренебречь [1].

В так называемой переходной области теплоотдача может быть рассчитана по следующей зависимости:

$$Nu_{жс} = f(Re_{жс}) Pr_{жс}^{0,48}, \quad (5.2)$$

где $f(Re_{жс})$ – функция, зависящая от $Re_{жс}$ (табл. 5.1).

Т а б л и ц а 5.1

Зависимость $Re_{жс}$ от $f(Re_{жс})$

$Re_{жс}$	2300	2500	3000	3500	4000	5000	6000	7000	8000	9000	$>10^4$
$f(Re_{жс})$	3,6	4,9	7,5	10	12,2	16,5	20	24	27	30	$0,021 Re_{жс}^{0,8}$

Критерии подобия вычисляются по следующим зависимостям:

Нусельта

$$Nu_{жс} = \alpha d / \lambda_{жс},$$

Рейнольдса

$$Re_{жс} = w d / \nu_{жс},$$

Прандтля

$$Pr_{жс} = \nu_{жс} / \alpha_{жс},$$

где $\nu_{жс}$ – кинематическая вязкость, m^2/c ;

$\alpha_{жс}$ – температуропроводность воздуха m^2/c ;

$\lambda_{жс}$ – теплопроводность, $Вт/(м \cdot К)$;

d – внутренний диаметр, $м$;

$g = 9,81$ ускорение свободного падения, m^2/c ;

w – средняя скорость, $м/с$;

$t_{жс}$ – средняя температура жидкости, $^{\circ}C$.

Описание экспериментальной установки

Рабочий участок установки ([рис. 5.1](#)) представляет собой трубку 2 из нержавеющей стали (размеры указаны на рисунке), один конец которой соединен с атмосферой, а другой – шлангом с центробежным вентилятором. Опоры 1 и 3, в которых закреплена трубка, изготовлены из фторопласта. Они тепло- и электроизолируют трубку 2 от остальных элементов конструкции. На концах трубки припаяны медные шайбы, к которым от понижающего трансформатора подводится электрический ток низкого напряжения для нагревания рабочего участка. Электрическое сопротивление трубки составляет 0,0344 Ом.

На [рис. 5.1](#) показана схема экспериментальной установки. В реальной схеме напряжение в цепи нагревателя регулируется автотрансформатором ЛАТР-2М-2а и регистрируется цифровым комбинированным прибором Щ-4313

–26. Температура стенки трубки измеряется десятью термопарами ТХК 1-10, горячие спаи которых припаяны к ее наружной поверхности. Термопарами 11 и 12 измеряется температура на входе и выходе из трубки соответственно.

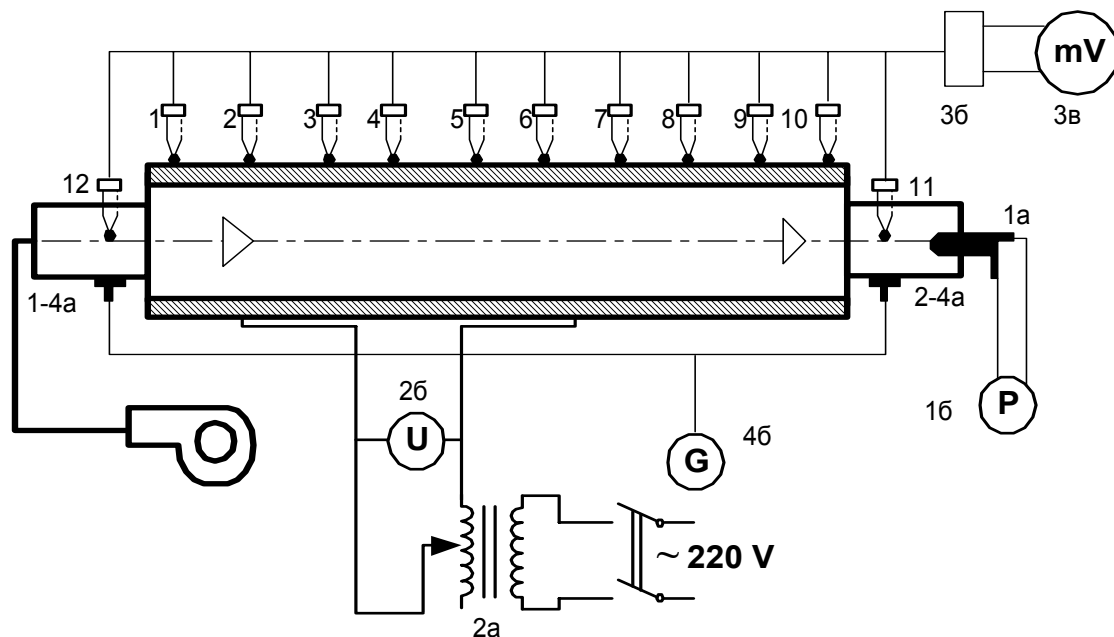


Рис. 5.1. Схема экспериментальной установки

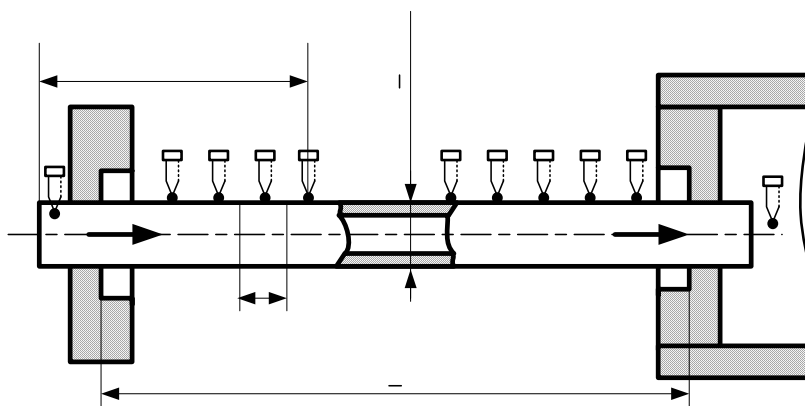


Рис. 5.2. Рабочий участок установки ТП-005

Координаты горячих спаев термопар, отсчитываемые от входа, приведены табл. 5.2.

Т а б л и ц а 5.2

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x_i	25	45	85	155	250	370	490	610	695	715
L_i	25	30	55	82,5	107,5	120	120	102,5	52,5	25

Здесь i – номер термопары; x_i – координата горячего спаея; L_i – длина участка трубы, соответствующего i – термопаре (см. рис. 5.1).

Номера термопар, указанные на схеме измерений, соответствуют позициям на переключателе 3б. ТермоЭДС термопар измеряется милливольтметром 3 в с автоматической компенсацией температуры холодных спаев.

Скорость воздуха на рабочем участке измеряется трубкой Пито-Прандтля в комплекте с дифференциальным манометром 1 б, измеряющим динамический напор ΔH . С помощью второго дифманометра 4 б измеряется падение давления ΔP на рабочем участке.

Регулирование скорости воздуха осуществляется изменением частоты вращения электродвигателя вентилятора регулятором напряжения.

Математическая модель установки, представленная в компьютерном варианте (см. рис 5.3 Mmtp005MT) повторяет все перечисленные элементы реальной экспериментальной установки. Данные по динамическому напору ΔH и перепаду давления на рабочем участке ΔP представлены в Па, падение напряжения в – В, показания термопар в – °С.

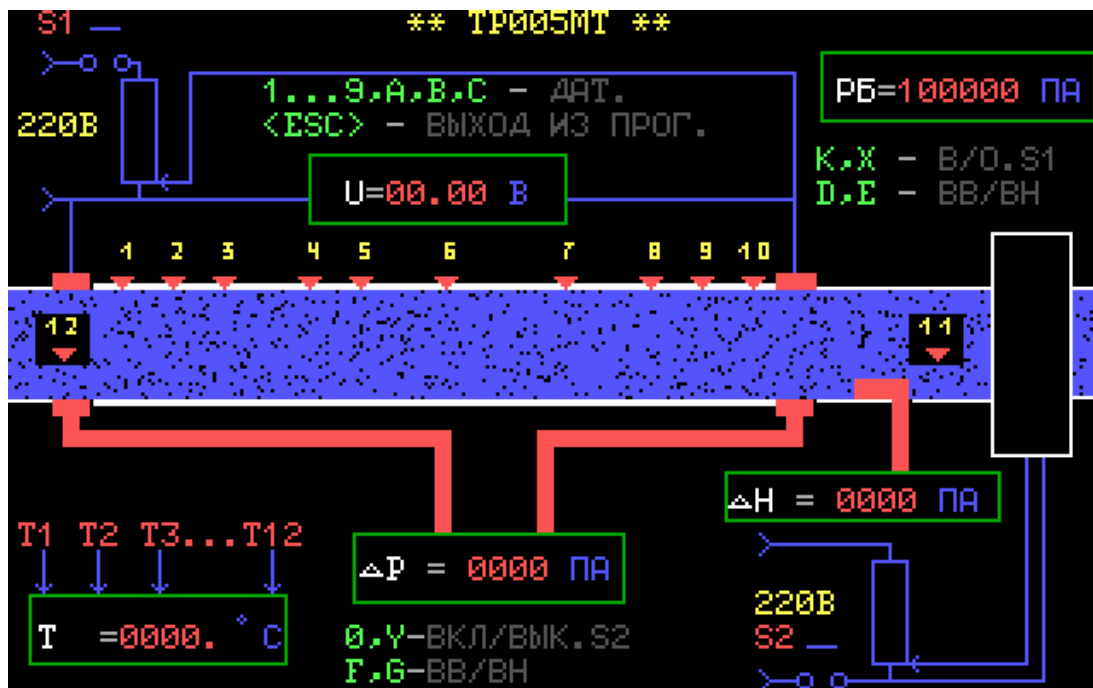


Рис. 5.3 Схема математического моделирования экспериментальной установки ТП– 005MT

Методика расчета

Для представления полученных экспериментальных данных в критериальной форме определяется тепловой поток Q , Вт, на рабочем участке по формуле

$$Q = U^2/R_s, \quad (5.3)$$

где U – напряжение, заданное на рабочем участке трубы;

R_3 – сопротивление рабочего участка, Ом.

Подсчитывается массовый расход воздуха по показаниям трубки Пито-Прандтля:

$$M = \xi \cdot F \cdot \sqrt{2\rho\Delta H}, \quad (5.4)$$

где F – поверхность трубки, м²;

$\xi = 0,96$ – коэффициент, полученный по результатам градуировки расходомерного устройства;

ΔH – динамический напор, измеряемый трубкой Пито-Прандтля, Па;

$\rho = p/[R(t_{11}+273)]$ – плотность воздуха в измерительном сечении, кг/м³;

$R = 287$ Дж/(кг·К) – газовая постоянная воздуха;

$p = B - \Delta P$ – абсолютное давление воздуха в измерительном сечении, Па.

ΔP – падение давления на рабочем участке, Па;

B – барометрическое давление, Па;

В связи с тем, что при нагреве рабочего участка в условиях $q_{cm} = \text{const}$ температура жидкости по длине трубки x изменяется по линейному закону, средняя температура жидкости определяется по формуле

$$t_{жс} = 0,5 (t_{11} + t_{12}). \quad (5.5)$$

Подсчитывают среднюю плотность жидкости

$$\rho_{жс} = p / [R (t_{жс} + 273)], \quad (5.6)$$

где $p \approx B$ – среднее абсолютное давление жидкости по длине рабочего участка, Па.

Вычисляют значения температурного напора в сечениях трубки с координатами x_i ($i = 1, 2, \dots, 10$)

$$\Delta t_i = (t_{cti} - t_{12}) - \frac{(t_{11} - t_{12})}{730} x_i, \quad (5.7)$$

где x_i – координаты горячих спаев термопар, м;

$t_{12} \approx t_{oc}$, °С;

t_{oc} – температура окружающей среды, °С.

Определяют локальные значения коэффициента теплоотдачи по формуле

$$\alpha_i = (Q - Q_n) / (\Delta t_i \pi d L), \quad (5.8)$$

где Q_n – потери теплоты с наружной поверхности рабочего участка в окружающую среду за счет свободной конвекции, излучения и торцовых потерь, подсчитывается по формуле

$$Q_n = k (\bar{t}_{ct} - t_{12}), \quad (5.9)$$

где $\bar{t}_{ct} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{10} t_{cti}}{10} \right)$ – средняя температура стенки, °С;

$\bar{k} = 0,18$ – коэффициент, определенный опытным путем.

Подсчитывают среднее значение коэффициента теплоотдачи по формуле

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=2}^9 \alpha_i L_i}{\sum_{i=2}^9 L_i} \quad (5.10)$$

При определении среднего значения коэффициента теплоотдачи значения α_1 и α_{10} вследствие влияния утечек теплоты с торцов рабочего участка исключаются из рассмотрения.

По полученным локальным значениям коэффициента теплоотдачи определяется основной участок трубы (участок стабилизированного течения), где коэффициент теплоотдачи α_i перестает зависеть от условий на входе в трубу.

Подсчитывают значения коэффициентов теплоотдачи α на основном участке трубы по зависимости (5–2), в которой число Рейнольдса определяется по массовому расходу M и средней плотности жидкости $\rho_{ж}$:

$$Re_{ж} = w d / \nu_{ж} = 4M / (\pi \rho_{ж} \nu_{ж} d). \quad (5.11)$$

Сравнивают полученные результаты с экспериментальными значениями α .

Строится график зависимости (5–1) в логарифмических координатах $lg Nu_{ж}$, $lg Re_{ж}$, на который нанести полученные экспериментальные значения, соответствующие основному участку трубы для исследованных режимов.

Порядок выполнения работы

Работа выполняется в следующей последовательности:

1. Убедиться, что все системы измерений находятся в исходном варианте.
2. Тумблером S2 ([см. схему](#)) включить центробежный вентилятор, установив с помощью реостата первоначальный перепад давления $\Delta H = 200$ Па.
3. Тумблером S1 подать напряжение на рабочий участок исследуемой трубы, для чего нажать клавишу К.
4. Установить падение напряжения на рабочем участке трубы $U = 1,1$ В.
5. Измерить динамический напор ΔH , показываемый трубкой Пито-Прандтля.
6. Записать показания всех 12 термопар, шкала которых градуирована в градусах Цельсия (клавиши 1 – 9, А, В, С).
7. Установить с помощью реостата (клавиша F) перепад давления, равный 400 Па.
8. Записать показания динамического напора и показания всех 12 термопар.

9. Повторить измерения при $\Delta H = 800$ и 1600 Па.
10. Установить с помощью реостата (клавиша D) падение напряжения $U = 1,3$ В.
11. Снять показания динамического напора ΔP и показания термопар при ΔH соответственно $200, 400, 800, 1600$ Па.
12. Повторить опыты при падении напряжения $U = 1,5$ и $1,7$ В.
13. Снятые показания свести в сводную таблицу измерений (табл. 5.3). По окончании опыта снять напряжение с рабочего участка (клавиша X), отключить вентилятор (клавиша Y). В случае выхода из программы следует нажать $\langle Esc \rangle$, в случае продолжения работы – $\langle Enter \rangle$.

Т а б л и ц а 5.3

№ п/п	ΔP , Па	ΔH , Па	U , В	Температура, °С											
				T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9	T_{10}	T_{11}	T_{12}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
I															
II															
III															
IV															

[Содержание](#)

Лабораторная работа № 6 (Т П – 0 0 6) ТЕПЛОТДАЧА ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ПОПЕРЕЧНОМ ОБТЕКАНИИ ОДИНОЧНОЙ ТРУБЫ

Цель работы

1. Определение среднего коэффициента теплоотдачи при вынужденном поперечном обтекании трубы воздухом.
2. Нахождение локальных коэффициентов теплоотдачи по периметру трубы.
3. Обобщение результатов опыта в критериальной форме и сравнение полученных результатов с экспериментальными данными литературных источников.

Теоретические сведения

Омывание трубы поперечным неограниченным потоком жидкости характеризуется рядом особенностей по сравнению с продольным обтеканием

поверхности. При поперечном обтекании одиночной трубы пограничный слой имеет наименьшую толщину в любой части трубы и нарастает, начиная от точки раздвоения потока к миделевому сечению ($\varphi = 90^\circ$). Безотрывное плавное обтекание труб имеет место лишь при малых числах Рейнольдса порядка $Re \approx 5$ (рис. 6.1, а). При больших значениях имеет место отрыв струи, и в кормовой части трубы образуется вихревая зона (рис. 6.1, б, в). Положение точки отрыва струи не является стабильным и зависит от характера движения невозмущенного потока [2].

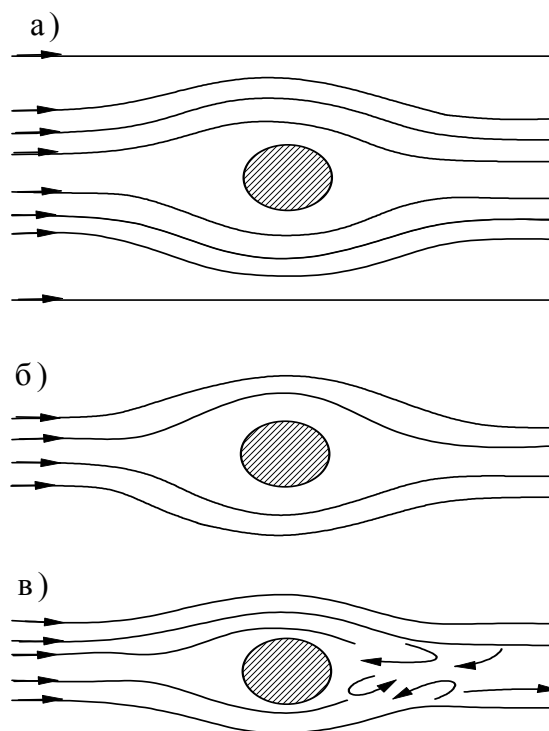


Рис. 6.1. Поперечное обтекание цилиндра вязкой жидкостью: безотрывное (а); с отрывом струи (б); с образованием вихревой зоны (в)

При сравнительно небольших числах Рейнольдса и малой степени турбулентности потока наблюдается отрыв ламинарного пограничного слоя, который имеет место при $\varphi \approx 82^\circ$. С возрастанием скорости потока подтормаживание течения за счет роста давления вдоль потока приводит не к отрыву, а к переходу движения в слое в турбулентную форму. Турбулентный пограничный слой обладает большей кинетической энергией. В результате место отрыва резко смещается по потоку, и отрыв пограничного слоя происходит при $\varphi \approx 140^\circ$ (рис. 6.2). Своеобразный характер омыwania трубы отражается и на ее характере. При турбулентном режиме обтекание цилиндра улучшается, и теплоотдача увеличивается.

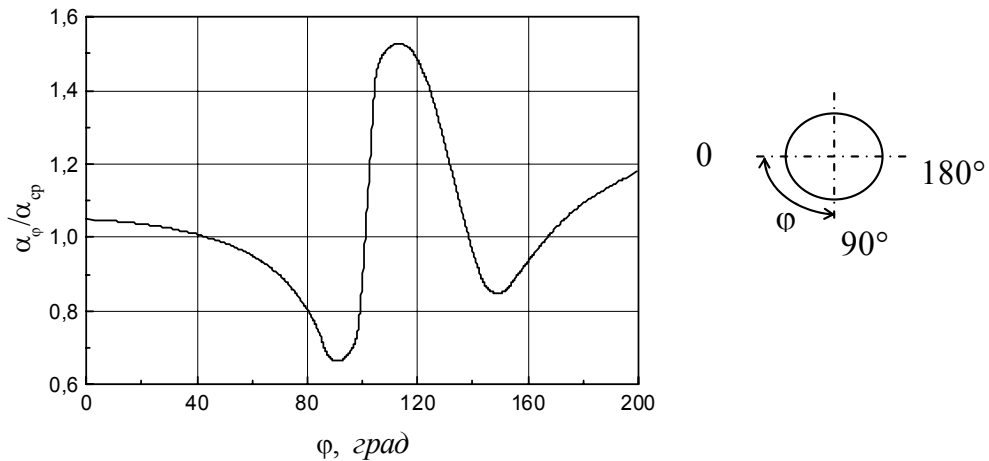


Рис. 6.2. Изменение относительного коэффициента теплоотдачи при поперечном обтекании трубы

На [рис. 6.3](#) показано распределение локальных (местных) коэффициентов теплоотдачи по поверхности цилиндра при разных числах Рейнольдса. Значение критерия Nu максимально в точке раздвоения потока (лобовая часть) и падает до значений, соответствующих углу отрыва пограничного слоя. Как видно из рисунка, с увеличением Re роль кормовой части трубы в теплообменнике возрастает.

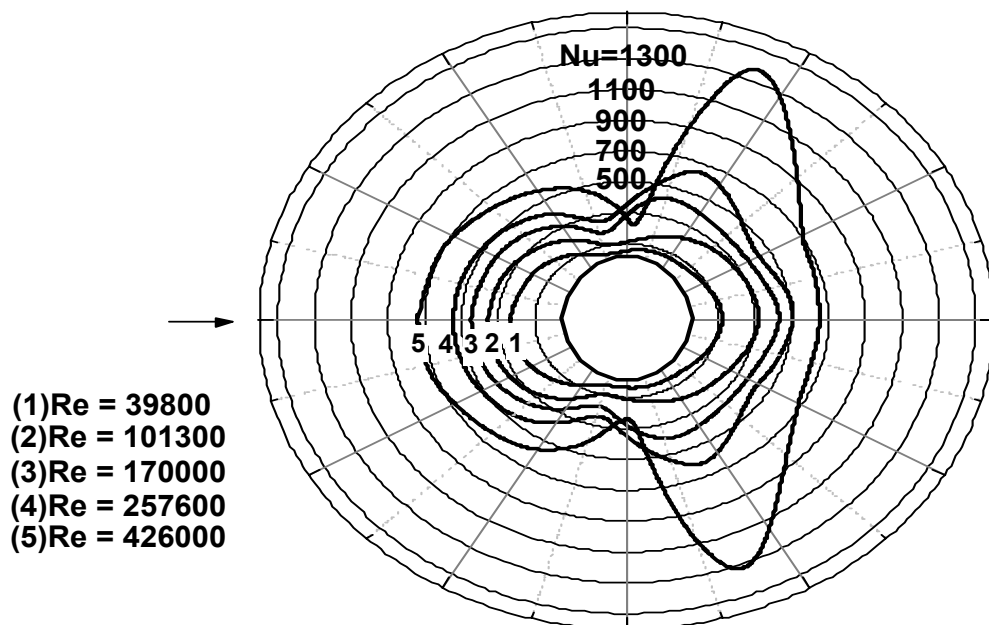


Рис. 6.3. График распределения чисел Nu по поверхности цилиндра

Подробные исследования средней по окружности трубы теплоотдачи проведены А.А. Жуксускасом [1]. Средний коэффициент теплоотдачи для случая поперечного обтекания одиночной трубы определяется по формулам:

$$\text{при } Re_{\text{жид}} = 5 \dots 1 \cdot 10^3$$

$$\overline{Nu}_{жcd} = 0,5 \cdot Re_{жcd}^{0,5} \cdot Pr_{ж}^{0,38} \cdot \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25}, \quad (6.1)$$

для воздуха

$$\overline{Nu}_{жд} = 0,43 Re_{жд}^{0,5}; \quad (6.2)$$

при $Re_{жд} = 1 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^3$

$$\overline{Nu}_{жcd} = 0,25 \cdot Re_{жcd}^{0,6} \cdot Pr_{жс}^{0,38} \cdot \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25}, \quad (6.3)$$

для воздуха

$$Nu_{жд} = 0,216 Re_{жд}^{0,6}. \quad (6.4)$$

За определяющий геометрический размер принят наружный диаметр трубы d . Скорость W_0 отнесена к самому узкому сечению канала, в котором расположена труба.

Приведенные формулы справедливы при поперечном обтекании трубы, когда так называемый "угол атаки" $\varphi = 90^\circ$. При $\varphi < 90^\circ$ коэффициент теплоотдачи снижается, для чего вводится поправочный коэффициент $\varepsilon_\varphi < 1$.

Локальные (местные) коэффициенты теплоотдачи в характерных точках определяются из уравнения теплового баланса.

Описание экспериментальной установки

Для исследования коэффициента теплоотдачи при поперечном омывании одиночной трубы используется установка (рис. 6.4), состоящая из аэродинамической трубы 1, помещенной в ней исследуемой трубы 4, осевого вентилятора с электродвигателем и блока измерений, и универсального блока питания с реостатом 6, вольтметром 7, амперметром 8.

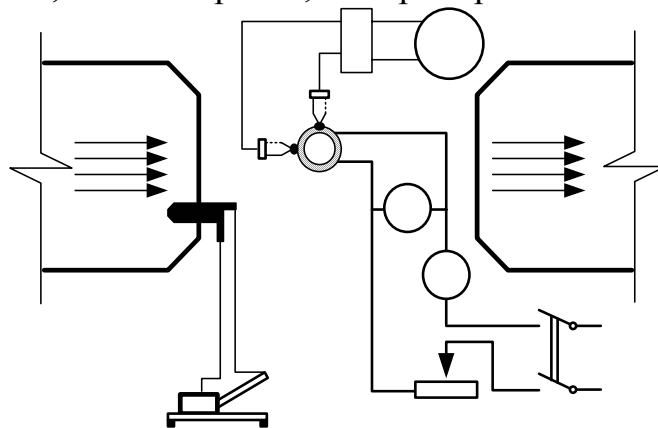


Рис. 6.4. Схема экспериментальной установки

- 1 – аэродинамическая труба; 2 – трубка Пито-Прандтля; 3 – микроманометр;
4 – исследуемый цилиндр; 5 – металлизированная фольга; 6 – реостат;
7 – вольтметр; 8 – амперметр

Модель цилиндра представляет собой гетенаксовый цилиндр 4, на который плотно намотана металлическая фольга 5. Лента нагревается с помощью электрического тока. Температура поверхности в характерных точках измеряется с помощью заделанных под поверхность фольги хромель-копелевых термопар 3. Рабочий участок цилиндра с расположением термопар показан на рис. 6.5. Система нагрева цилиндрической поверхности изменяется в зависимости от задаваемого на блоке питания напряжения. Модель цилиндра подключается с помощью разъема к каналу 2 блока питания. Температура набегающего потока измеряется отдельной хромель-копелевой термопарой 4, установленной по оси набегающего потока. Все термопары подключены к цифровому вольтметру через блок подключения.

Скорость набегающего потока измеряется в рабочей области трубы трубкой Пито-Прандтля 2, соединенной с микроманометром 3 (см. рис. 6.4).

Температура окружающей среды измеряется ртутным термометром, давление – барометром.

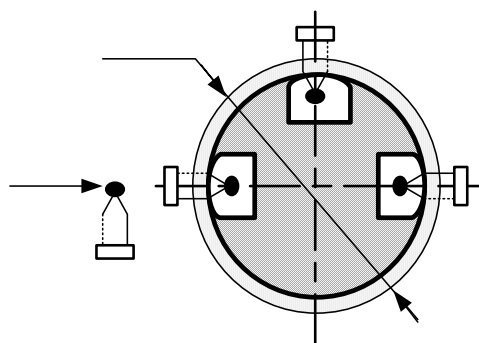


Рис. 6.5. Рабочий участок установки

1,2,3 – ХК термопары по периметру цилиндра; 4 – ХК термопара по оси набегающего потока; 5 – металлизированная фольга; 6 – исследуемый цилиндр

Методика расчета

Чтобы представить полученные зависимости в критериальной форме, необходимо определить тепловой поток по электрической мощности нагревателя:

$$Q = I \cdot U, \quad \text{Вт}, \quad (6.5)$$

где I – сила электрического тока, А;

U – падение напряжения на нагревателе рабочего участка, В.

Затем определяют локальные значения коэффициентов теплоотдачи по формуле

$$\alpha = \frac{Q}{F(T_{cti} - T_e)}, \quad \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (6.6)$$

где $F = \pi d \cdot l$ – суммарная поверхность нагревателя, м²;

T_{cti} – температура стенки в местах закрепления термопар, К;

T_e – температура воздуха, обтекающего пластину, К;

$d = 0,0295$ – диаметр цилиндра, м;

$l = 0,120$ – длина цилиндра, м.

Скорость потенциального потока определяют по показаниям микроманометра.

Для трех режимов скоростей вычисляют критерии подобия Nu и Re_x , строят в логарифмической системе координат зависимость $lg(Nu)-lg(Re_x)$ и обобщают экспериментальные данные в виде

$$Nu = C Re_x^n. \quad (6.7)$$

Определяют постоянные C и показатель степени n для ламинарной и турбулентной формы течения в пограничном слое как параметры прямых линий, построенных в координатах $lg(Nu)$, $lg(Re_x)$:

$$lg(Nu) = C + n lg(Re_x). \quad (6.8)$$

В логарифмических координатах постоянная C представляет собой отрезок, получающийся при пересечении прямой с осью ординат (рис. 6.6); показатель степени n – это тангенс угла наклона φ [3].

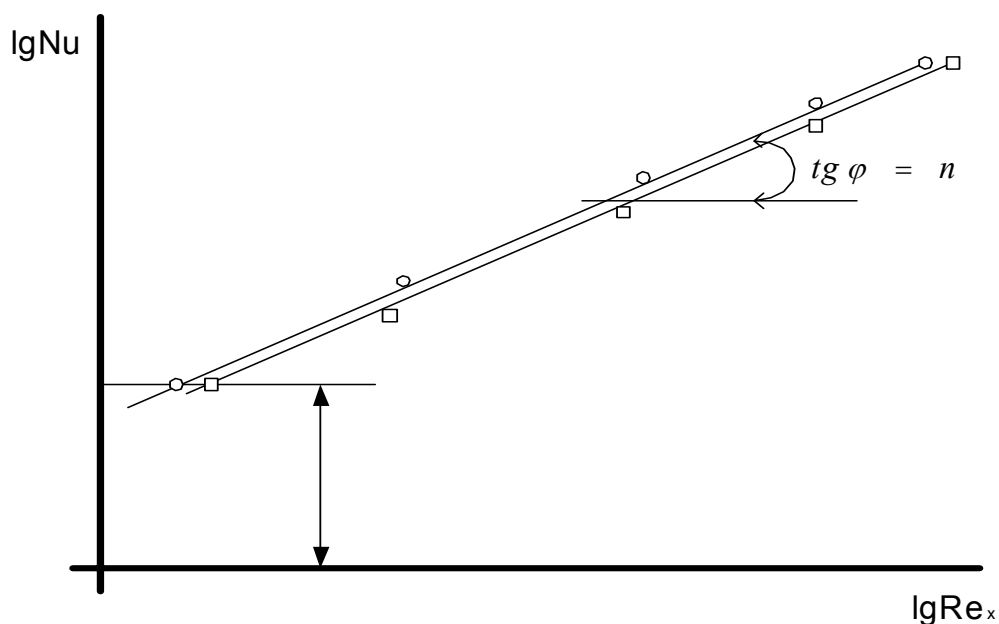


Рис. 6.6 Зависимость $Nu = C Re_x^n$ в логарифмических координатах

Полученные зависимости сравнить с имеющимися в литературе данными.

Порядок выполнения работы

Модель цилиндра размещается на оси набегающего потока аэродинамической трубы таким образом, чтобы создать поперечное обтекание ее рабочей поверхности.

Работа выполняется в следующей последовательности:

1. Кабель питания пластины подключить к контакту 2 блока питания; соединительные провода от блока переключателя термопар соединить с милливольтметром.

2. При отсутствии потока воздуха в аэродинамической трубе отметить начальное показание микроманометра l_0 .

3. Установить с помощью регулятора напряжения ток на пластине порядка 1,8 А и дождаться выхода нагревателя в стационарный режим (примерно 10-15 мин.).

4. Включить блок питания аэродинамической трубы. Установить необходимое значение скорости воздушного потока в рабочей зоне трубы, изменяя ток питания осевого вентилятора.

5. Измерить значение скорости W_0 потока с помощью трубки Пито-Прандтля, для чего снять показание микроманометра l при данном режиме. Провести все замеры температур при данной скорости потока и первоначальной тепловой нагрузке.

6. Изменить величину скорости воздушного потока в аэродинамической трубе. Провести все вышеуказанные измерения при 3 различных скоростных режимах.

7. Повторить измерения при двух различных тепловых нагрузках, увеличив ток через поверхность цилиндра до 2,5 А с помощью регулятора напряжения.

8. Данные измерений свести в [табл. 6.1](#).

Т а б л и ц а 6.1

№ режима	№ п/п	Показания микроманометра		Параметры цилиндра		Показания милливольтметра, мВ				$T_{в}, K$	$P_{бар}, MPa$
		$l_0, мм$	$l, мм$	$U, В$	$I, А$	термопары					
						1	2	3	4		
I	1										
	2										
	3										
	ср.										
II	1										
	2										
	3										
	ср.										
III	1										
	2										
	3										
	ср.										

9. После окончания опыта отключить питание рабочего участка цилиндра, выключить осевой вентилятор и питание всех измерительных приборов.

Обработка результатов измерений

Для обработки экспериментальных данных выполняют следующие операции:

1. Исходя из показаний микроманометра, определяют среднюю скорость набегающего потока по формуле

$$U_0 = \sqrt{2g \frac{\rho_{жс}}{\rho_в} k(l - l_0)}, \text{ м/с},$$

где $\rho_{ж}$ – плотность спирта в микроманометре ($\rho_{ж} = 809,5 \text{ кг/м}^3$);

$\rho_в$ – плотность воздуха ($\rho_в = 1,2 \text{ кг/м}^3$);

$l - l_0$ – разность показаний микроманометра, м;

k – синус угла наклона трубки микроманометра (указан на угловой шкале микроманометра).

2. Используя данные измерений термопар в мВ, по градуировочной таблице ХК ([см. приложение](#)) определяют температуры в характерных точках и температуру набегающего потока с учетом температуры холодных спаев $T_{хсп} = T_в$.

3. Определяют тепловой поток по электрической мощности нагревателя ([по формуле 6.5](#)); затем, используя [формулу 6.6](#), определяют местные (локальные) коэффициенты теплоотдачи α по периметру трубы.

4. Вычисляют для трех режимов критерии подобия Nu и $Re_{ж}$; в логарифмическом масштабе строят зависимость $lg(Nu) - lg(Re_{ж})$; обобщают экспериментальные данные, определив постоянные C в виде

$$Nu = C Re_{ж}^n$$

и показатели степени n для ламинарного и турбулентного течения в пограничном слое как параметры прямых линий:

$$lg(Nu) = C + lg(Re_{ж}).$$

5. Данные расчетов сводят в [табл. 6.2](#). Полученные значения коэффициентов C и n , входящие в критериальные уравнения локальных средних коэффициентов теплоотдачи, сравнивают с литературными значениями для аналогичных случаев. Выясняют, от каких факторов зависит характер теплоотдачи и как это влияет на коэффициент теплоотдачи.

Т а б л и ц а 6.2

№ режима	№ опыта	W_0 , м/с	$Re_{ж}$	Q , Вт	Температура рабочего участка, К			$T_{ж}$, К	$\bar{\alpha}$	$\bar{Nu}_{жд}$	α_{ϕ}	Nu_{ϕ}
					T_1	T_2	T_3					
I	1											
	2											
	3											
	ср											
II	1											
	2											
	3											
	ср											
III	1											
	2											
	3											
	ср											

[Содержание](#)

Лабораторная работа №7 (Т П –0 0 7)
ТЕПЛОТДАЧА ПРИ КИПЕНИИ ВОДЫ В БОЛЬШОМ ОБЪЕМЕ

Цель работы

1. Изучение теплоотдачи от горизонтальной трубы при пузырьковом кипении воды в большом объеме при атмосферном давлении.
2. Установление влияния температурного напора на интенсивность теплоотдачи.

Теоретические сведения

Основной задачей государственной национальной программы «Энергосбережение» является повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов и создания условий для целенаправленного перевода экономики Республики Беларусь на энергосберегающий путь развития.

Процессы кипения встречаются в различного рода устройствах, применяемых в теплоэнергетике, атомной энергетике, металлургии, холодильной и криогенной технике, химической, пищевой и других отраслях промышленности.

В большинстве парогенераторов теплоэнергетических установок, во всех испарителях холодильных и криогенных машин в настоящее время осуществляется процесс кипения на поверхности труб, стенок каналов и т.д.

Плотность теплового потока, отводимого от греющих источников при кипении жидкости, может быть весьма высокой ($q = 10^5 \dots 10^7$ Вт/м²) при умеренных температурных напорах. Этот процесс часто используют для отвода

больших количеств теплоты от относительно малых по площади поверхностей теплообмена.

Такие процессы, позволяющие существенно интенсифицировать процесс теплоотдачи, присущи многим энергосберегающим технологиям.

Кипением называется процесс парообразования во всем объеме жидкости, перегретой относительно температуры насыщения, характеризуемой возникновением новых свободных поверхностей раздела жидкой и паровой фаз.

Теплообмен при кипении жидкости связан с переходом рабочего тела из одного агрегатного состояния в другое. Такому теплообмену присущ ряд особенностей, благодаря чему физическая картина процесса в целом сильно отличается от процесса конвективного теплообмена в однофазной среде. Зарождение пузырьков пара происходит на обогреваемой поверхности, где подогрев жидкости наибольший, и только в отдельных точках, называемых **центрами парообразования**. Количество пузырьков пара тем больше, чем больше центров парообразования, сильнее перегрет пограничный слой, выше температурный напор и значительнее тепловая нагрузка поверхности нагрева.

При достижении определенных размеров пузырьки пара отрываются от поверхности и всплывают, а на их месте возникают новые.

Образующиеся пузырьки турбулизируют, разрушают пограничный слой, хорошо перемешивая жидкость как у поверхности нагрева, так и во всем объеме. Поэтому по сравнению с теплообменом в однофазной жидкости, теплоотдача при кипении отличается большой интенсивностью. Пока пузырьков пара относительно мало и они сохраняются до отрыва, режим кипения называется **пузырьковым**. С возрастанием температурного напора число центров парообразования непрерывно увеличивается, вследствие чего пузырьки пара сливаются между собой и образуют сплошную паровую пленку. Такой режим кипения называется **пленочным**. Интенсивность теплоотдачи при таком режиме резко снижается.

Интенсивность теплоотдачи при кипении определяется физическими свойствами кипящей жидкости, давлением и температурным напором, т.е. разностью между температурой рассматриваемой поверхности и температурой насыщения при данном давлении.

Методика расчета

Средний коэффициент теплоотдачи между опытной трубой и кипящей водой, характеризующий интенсивность теплоотдачи, определяется из уравнения Ньютона-Рихмана

$$\bar{\alpha} = \frac{Q}{F(T_n - T_{\text{н}})}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (7.1)$$

где Q – тепловой поток, передаваемый стенкой кипящей воде, Вт;
 F – поверхность стенки, м^2 ;
 $T_{\text{н}}$ – температура стенки, К;

T_n – температура кипения при атмосферном давлении, К.

Тепловой поток Q , передаваемый опытной трубкой воде, определяется исходя из мощности, потребляемой этой трубкой

$$Q = I \cdot k_{\text{тр}} \cdot U, \quad (7.2)$$

где I – сила тока, А;

$k_{\text{тр}}$ – коэффициент трансформации тока;

U – падение напряжения в опытной трубке.

Коэффициент теплоотдачи можно определить и расчетным путем, исходя из критериальных уравнений или приближенных зависимостей.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка для изучения теплоотдачи при кипении жидкости в большом объеме состоит из опытной горизонтальной трубки 1, помещенной в рабочий сосуд 2 с дистиллированной водой (рис. 7.1). Рабочий сосуд с исследуемой жидкостью помещен во второй (охранный) сосуд 3. Температура рабочего сосуда поддерживается в состоянии слабого кипения с помощью вспомогательного электрического нагревателя 4. Мощность, потребляемая нагревателем 4, регулируется с помощью автотрансформатора 5; напряжение на клеммах нагревателя регистрируется вольтметром 6. Напряжение на клеммах нагревателя регистрируется вольтметром 6.

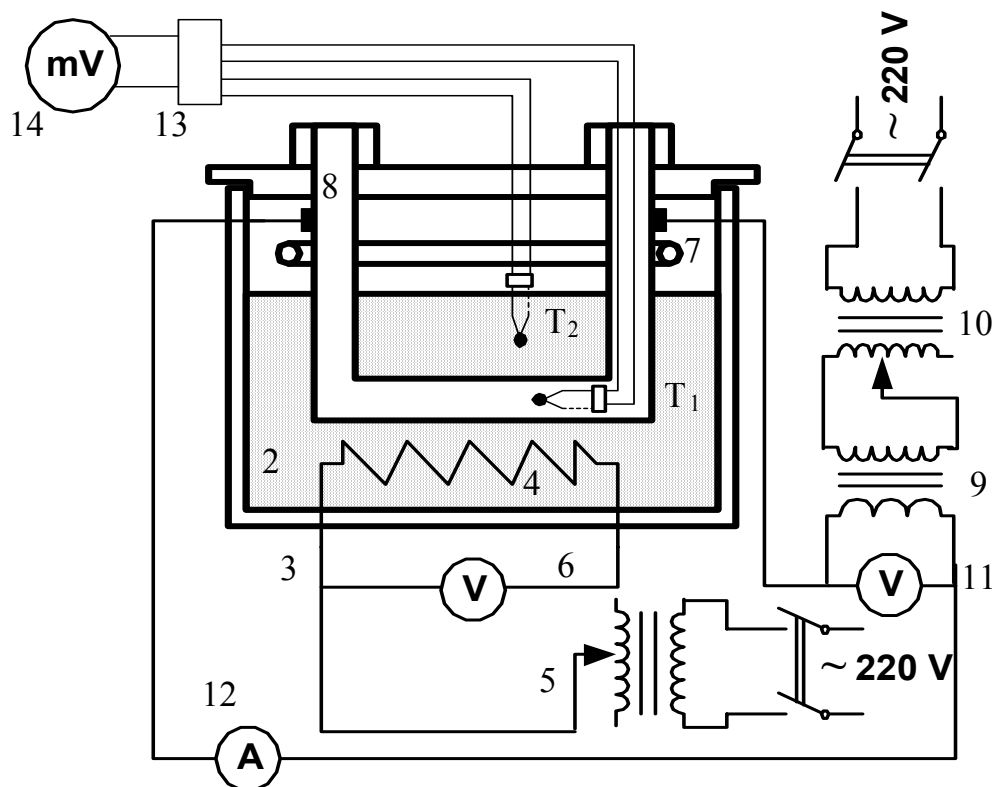


Рис. 7.1. Схема экспериментальной установки

Над перфорированной крышкой рабочего и охранного сосудов установлен теплообменник-конденсатор 7, через который прокачивается водопроводная вода. Пар, образующийся в рабочем сосуде при кипении, конденсируется на поверхности теплообменника и стекает в виде конденсата в рабочий объем сосуда.

Опытная трубка 1 через токоприемники 8 нагревается за счет пропускания электрического тока низкого напряжения от понижающего трансформатора 9, потребляемая мощность которого регулируется автотрансформатором 10. Измерение этой мощности производят с помощью вольтметра 11 и амперметра 12.

Внутри опытной тонкостенной трубки из нержавеющей стали заложена хромель-копелевая термопара T_1 , измеряющая температуру поверхности нагрева. Термопара T_2 показывает температуру воды в рабочем сосуде. Измерение ЭДС термопар производится с помощью цифрового вольтметра 14 через переключатель термопар 13.

Для визуального наблюдения за процессом теплоотдачи в стенках сосудов предусмотрены смотровые окна. Опытная трубка через одно из окон освещается лампой подсветки.

Порядок выполнения работы

Опыт проводится в следующей последовательности:

1. Подать охлаждающую воду в теплообменник–конденсатор, включить электропитание установки. Поворотом ручки автотрансформатора 7 включить основной нагревательный элемент 4 и установить максимальную мощность нагрева. По истечении 20–30 мин воду в сосуде довести до кипения, что регистрируется термопарой T_2 . После начала кипения мощность нагревателя уменьшить с помощью автотрансформатора до необходимой для поддержания температуры на уровне кипения воды.

2. Включить освещение емкости, заполненной дистиллированной водой, и блок питания экспериментального участка. Медленным поворотом ручки автотрансформатора 15 увеличить ток в цепи до появления слабого пузырькового кипения. Записать показания термоЭДС термопар T_1 и T_2 , а также падение напряжения U и силы тока I в цепи. Перевести показания термоЭДС термопар в градусы К с учетом температуры холодных спаев, используя градуировочные таблицы для хромель-копелевых термопар ([см. приложение](#)).

3. Опыты провести для 3–4 тепловых режимов; произвести не менее 3 записей показаний всех приборов при установившемся тепловом режиме.

4. Результаты измерений занести в [табл. 7.1](#).

Т а б л и ц а 7.1

№ пп	T_1		T_2		T_{xc} К	U , В	I , А	P_a , Па
	мВ	К	мВ	К				

Обработка результатов измерений

Для обработки опытных данных используют лишь данные, полученные при установившемся тепловом режиме при различных температурных напорах. Обычно берут средние значения показания приборов для каждого из режимов.

Средний коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}$ вычисляют исходя из уравнений (7.1) и (7.2), приведенных выше.

В качестве расчетной температуры поверхности трубки принимают среднюю арифметическую из измеренных по длине опытной трубки.

Для пузырькового кипения в условиях естественной конвекции в качестве определяющей принимают температуру насыщения T_s .

В случае задания температурного напора $\Delta T = T_n - T_s$ средний коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}$ определяют из уравнений:

$$\bar{Nu}_s = 2,63 \cdot 10^{-3} (B_s \Delta T)^{1,86} Pr_s^{0,952} \quad \text{при } B_s \Delta T Pr_s^{0,5} \geq 1,6;$$

$$\bar{Nu}_s = 3,91 \cdot 10^{-3} (B_s \Delta T) Pr_s^{2/3} \quad \text{при } B_s \Delta T Pr_s^{0,33} < 1,6,$$

где \bar{Nu}_s – критерий Нуссельта, $\bar{Nu}_s = \frac{\bar{\alpha} Nu_s l_s}{\lambda}$;

Pr_s – критерий Прандтля, $Pr_s = \frac{\nu}{a}$;

B_s – безразмерный критерий кипения, $B_s = \frac{\lambda}{r \rho_n \nu}$;

l_s – определяющий размер, м, $l_s = \frac{c_p \rho_{ж} \sigma T_{ж}}{(\rho_n r)^2}$,

где r – теплота парообразования, кДж/кг;

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

ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с;

a – коэффициент температуропроводности, м²/с;

c_p – удельная теплоемкость, кДж/(кг·К).;

σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м;

$\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³;

$\rho_{п}$ – плотность пара, кг/м³.

При тепловой нагрузке q , Вт/м²,

$$Nu_s = 0,125 \cdot Re_s^{0,65} Pr_s^{0,33} \quad \text{при } Re_s \geq 0,01;$$

$$Nu_s = 0,0625 \cdot Re_s^{0,5} Pr_s^{0,33} \quad \text{при } Re_s < 0,01,$$

где $Re_s = q \cdot A_s = q \cdot \frac{l_s}{r \nu \rho_n}$.

Значения l_s , A_s , B_s приведены в [табл. 7.2](#) и зависят от температуры насыщения.

Опытные данные сравнивают с результатами расчета среднего коэффициента теплоотдачи по зависимостям, полученным при пузырьковом кипении воды:

$$\bar{\alpha}_{расч} = 38,7 \Delta T^{2,33} p^{0,5}, \quad \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$$\bar{\alpha}_{расч} = 3,0 q^{0,7} p^{0,15}, \quad \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

где q – плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$;
 p – давление, бар.

Т а б л и ц а 7.2

$T_s, \text{ }^\circ\text{C}$	$l_s \cdot 10^6, \text{ м}$	$A_s \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{Вт}$	$B_s \cdot 10^2, \text{ К}^{-1}$
1.	2.	3.	4.
90	96,0	304	216
100	48,7	122,4	172
110	25,9	51,8	138

Расчетные данные сводят в [табл. 7.3](#).

По полученным значениям $\bar{\alpha}$ строят графические зависимости $\alpha = f_1(\Delta T)$ и $\alpha = f_2(q)$, где q – плотность теплового потока, $q = Q/F$, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Полученное экспериментальным путем значение среднего коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}$ сравнивают с расчетными значениями $\bar{\alpha}_{Nus}$ и $\bar{\alpha}_{расч}$. Результаты опыта и расчетные значения $\bar{\alpha}$ сравнивают с литературными данными.

Т а б л и ц а 7.3

Расчетные данные

№ пп	$T_s, \text{ К}$	$T_n, \text{ К}$	$\Delta T, \text{ К}$	$Q, \text{ Вт}$	$\bar{\alpha},$ $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$\bar{\alpha}_{Nus},$ $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$\bar{\alpha}_{расч}$ $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	Примечания
1								
2								
3								
ср.								
1								
2								
3								
ср.								

[Содержание](#)

Лабораторная работа №8 (Т П–0 0 8)
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗЛУЧЕНИЯ
ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Цель работы

1. Определение коэффициента излучения (лучеиспускания) исследуемого материала.
2. Сравнение полученных результатов с имеющимися в литературе экспериментальными данными.

Теоретические сведения

Тепловое излучение занимает особое положение среди других процессов переноса теплоты, так как физическая природа радиации принципиально отлична от передачи теплоты теплопроводностью и конвекцией.

Теплообмен излучением обусловлен превращением внутренней энергии вещества в энергию излучения, распространением ее в пространстве и поглощением телом или средой, которых она достигает.

Излучение – сложный процесс, связанный с тем, что вначале имеет место переход тепловой энергии в излучение электромагнитных волн – *эмиссия*, затем – *движение волн (фотонов)* и, наконец, поглощение электромагнитных колебаний поглощающей средой или телом – *абсорбция*.

Тепловое излучение рассматривается как процесс распространения электромагнитных волн, испускаемых излучающим телом.

Лучеиспускание свойственно всем телам; каждое из них излучает энергию непрерывно.

Количество возникающей в теле лучистой энергии, излучаемой в единицу времени единицей поверхности абсолютно черного тела, определяется *законом Стефана-Больцмана* [1]

$$E_0 = \sigma_0 T^4, \text{ Вт/м}^2, \quad (8.1)$$

где $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – *константа излучения абсолютно черного тела*;

T – абсолютная температура, К.

В технических расчетах закон Стефана-Больцмана удобнее применять в иной форме:

$$E_0 = C_0 (T/100)^4, \text{ Вт/м}^2, \quad (8.2)$$

Где $C_0 = 5,67 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – коэффициент излучения абсолютно-черного тела.

Закон Стефана–Больцмана можно применять и для *реальных (серых) тел*. Для этого вводится понятие *степени черноты ϵ* , которое определяется

как отношение величины лучистого потока серого тела E к значению лучистого потока абсолютно-черного тела E_0 при той же температуре:

$$\varepsilon = E/E_0 = C / C_0 \leq 1, \quad (8.3)$$

где C – коэффициент излучения реального (серого) тела, Вт/(м² К⁴).

Степень черноты показывает, насколько данное тело приближается по своим излучательным свойствам к абсолютно черному телу. Она зависит от природы тела, состояния поверхности, способа обработки и температуры. Значения ε для различных тел приводятся в справочной литературе [2].

Для серого тела количество излучаемой энергии определяется по формуле

$$E = C(T/100)^4, \text{ Вт/м}^2. \quad (8.4)$$

В случае теплообмена излучением между телом и его оболочкой результирующий поток излучения Q_{12} определяется [3] по формуле

$$Q_{12} = C_{12} [\{T_1/100\}^4 - \{T_2/100\}^4] F_1, \text{ Вт}, \quad (8.5)$$

где

$$C_{12} = 1 / [1/C_1 + F_1/F_2 \{1/C_2 - 1/C_0\}] \quad (8.6)$$

приведенный коэффициент излучения рассматриваемой системы тел, Вт/(м²·К⁴);

C_1, C_2 – коэффициенты излучения тела и оболочки, Вт/(м² К⁴);

F_1, F_2 – площади поверхностей тела и оболочки, м²;

T_1, T_2 – абсолютные температуры тела и оболочки, К.

В случае, когда поверхность исследуемого тела меньше поверхности оболочки, т.е. $F_1 \ll F_2$, выражение (7.6) упрощается, и коэффициент излучения реального тела определяется по формуле

$$C_1 = Q_{12} / [\{T_1/100\}^4 - \{T_2/100\}^4], \text{ Вт/(м}^2 \text{ К}^4). \quad (8.7)$$

Описание экспериментальной установки

Изучение теплового излучения проводится на моделирующей установке, схема которой представлена на [рис. 8.1](#). Макет имитирующей установки позволяет математически моделировать процесс лучистого теплообмена. Рабочий участок установки представляет собой стеклянный калориметр 1, выполненный с двойными стеклами для охлаждения его проточной водой. Исследуемое тело – тонкая металлическая проволока 2 диаметром $d_1 = 2 \cdot 10^{-4}$ м, длиной $L_1 = 0,2$ м, впаянная в калориметр, нагреваемая электрическим током. Постоянная температура калориметра поддерживается с помощью охлаждающей воды 3. Влиянием конвекции можно пренебречь.

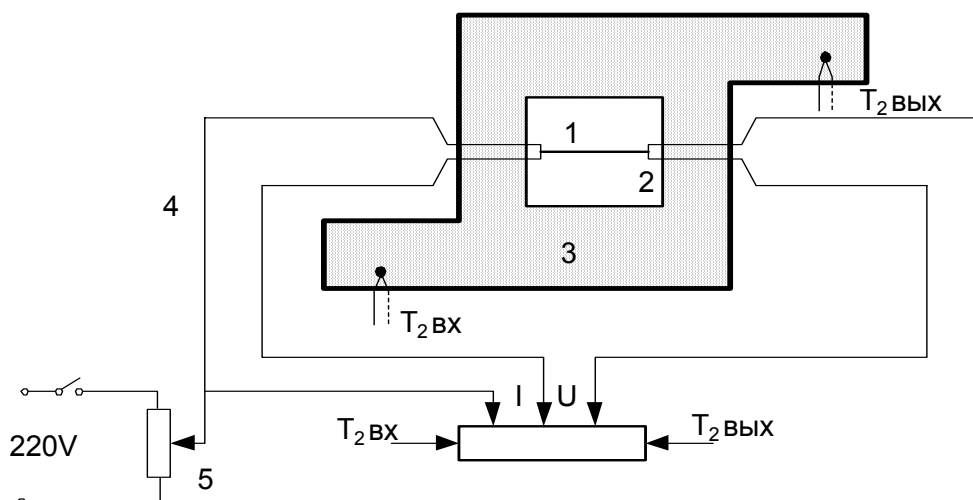


Рис. 8.1. Структурная схема установки

Моделирование теплового излучения воспроизводит реальный процесс лучеиспускания мультипликационным изображением структурной схемы установки на экране монитора (рис. 8.2 Mmtp 011). Проволока из электропроводящего материала подключена к электрической сети 4, в которой имеется реостат 5 для регулирования тока и напряжения. Температуры воды на входе в резервуар $T_{2ВХ}$ и на выходе из него $T_{2ВЫХ}$ измеряются хромель-копелевыми термопарами и выводятся на монитор компьютера.

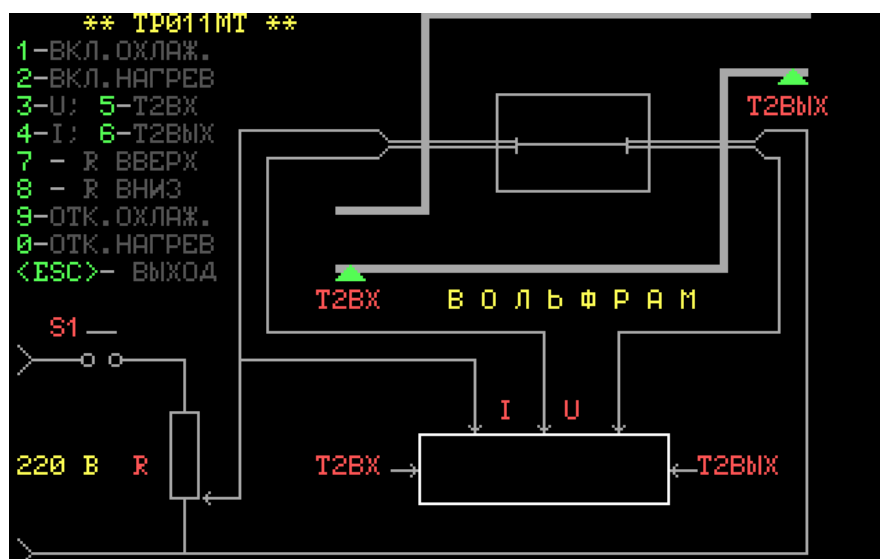


Рис. 8.2 Схема математического моделирования экспериментальной установки ТП- 0011МТ

Методика расчета

Тепловой поток, выделяемый в проволоке при прохождении по ней электрического тока Q_9 , равен тепловому потоку при излучении от проволоки к поверхности охлаждающей колбы Q_{12} :

$$Q_3 = Q_{12}, \text{ Вт.} \quad (8.8)$$

Величину Q_3 можно выразить через силу тока I и падение напряжения ΔU

$$Q_3 = \Delta U I = R \cdot I^2, \text{ Вт,} \quad (8.9)$$

где R – электрическое сопротивление проволоки, Ом,

$$R = \Delta U / I = \rho_1 \cdot L_1 / S_1, \quad (8.10)$$

где ρ_1 – удельное электрическое сопротивление, Ом·м;

L_1 – длина проволоки, м;

$S_1 = \pi d_1^2 / 4$ – площадь поперечного сечения проволоки, м².

$F_1 = \pi d_1 L_1$ – площадь поверхности проволоки, м².

Окончательно уравнение теплового баланса имеет вид

$$I^2 \rho_1 L_1 / S_1 = F_1 [\{T_1/100\}^4 - \{T_2/100\}^4] C_1 \quad (8.11)$$

Искомая величина коэффициента лучеиспускания C_1 определяется

$$C_1 = I^2 \rho_1 L_1 / S_1 / F_1 [\{T_1/100\}^4 - \{T_2/100\}^4]. \quad (8.12)$$

Степень черноты ε_1 определяется из уравнения (8.3)

$$\varepsilon_1 = C_1 / C_0. \quad (8.13)$$

Порядок выполнения работы

Убедившись, что все системы наблюдения находятся в исходном положении, можно приступить к исследованию лучистого теплообмена.

Работа выполняется в следующей последовательности:

1. Для ввода программы нажать $\langle \text{Enter} \rangle$.
2. Выбрать вид поверхности материала (1 – вольфрам; 2 – графит; 3 – медь; 4 – хром; 5 – нихром, 6 – молибден).
3. Выбрав материал, подтвердить клавишей $\langle Y \rangle$. Появится схема моделирующей установки с простановкой последующих операций.
4. Нажатием на клавишу $\langle 1 \rangle$ включить охлаждение колбы.
5. Нажатием на клавишу $\langle 2 \rangle$, включить нагрев исследуемого материала.
6. Клавишей $\langle 3 \rangle$ отрегулировать напряжение.
7. С помощью клавиш $\langle 4 \rangle, \langle 5 \rangle, \langle 6 \rangle$ отрегулировать силу тока, температуру воды на входе и на выходе из калориметра.
8. Изменяя напряжение U с помощью реостата R клавишей $\langle 3 \rangle$, записать показания силы тока I и температуры на входе $T_{2\text{вх}}$ и выходе из калориметра $T_{2\text{вых}}$.
9. Данные измерений занести в [табл. 8.1](#).
10. С помощью клавиш $\langle 9 \rangle, \langle 0 \rangle$ отключить нагрев нити и охлаждение калориметра.
11. С помощью клавиши $\langle \text{Esc} \rangle$ выйти из программы.

Данные измерений

№, п/п	Падение напряжения ΔU , В	Сила тока I , А	Температура $T_{2вх}$, °С	Температура $T_{2вых}$, °С	Примечание
1.	2.	3.	4.	5.	6.

Обработка результатов измерений

Расчет коэффициента излучения (степени черноты) проволоки (исследуемого материала) производится в следующей последовательности:

1. Исходя из результатов измерений для каждого установившегося процесса лучистого теплообменника подсчитывают результирующий поток излучения по формуле (8.9).

2. Определяют удельное электрическое сопротивление исследуемой проволоки по формуле (8.10).

3. В соответствии с выбранным материалом по графику $\rho = f\{T_1\}$ определяют температуру проволоки T_1 (рис. 8.3).

4. Находят среднюю температуру оболочки колбы по формуле

$$T_2 = (T_{2вх} + T_{2вых})/2$$

5. Исходя из формулы (8.12) находят коэффициент излучения C_1 , исходя из формулы (8.13) – степень черноты ε_1 исследуемого материала.

6. Данные расчетов сводятся в табл. 8.2.

7. Строят график зависимости степени черноты ε_1 в функции температуры исследуемого материала T_1 .

8. Исходя из графической зависимости $\varepsilon = f(T_1)$ анализируют влияние температуры по степени черноты исследуемого материала. Полученные значения коэффициента излучения материалов сравнивают с табличными данными, приведенными в литературе.

Т а б л и ц а 8.2

№ п/п	Q_{l2} , Вт.	R , Ом.	ρ_1 , Ом·м.	T_1 , К.	T_2 , К.	C_1 , Вт/(м ² К ⁴).	ε_1
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.

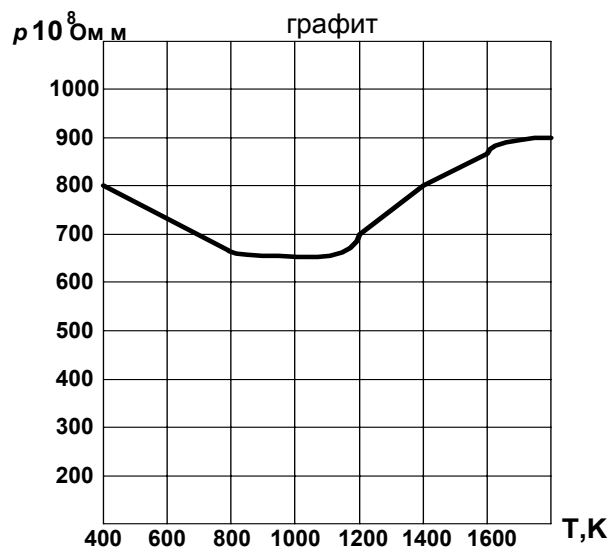
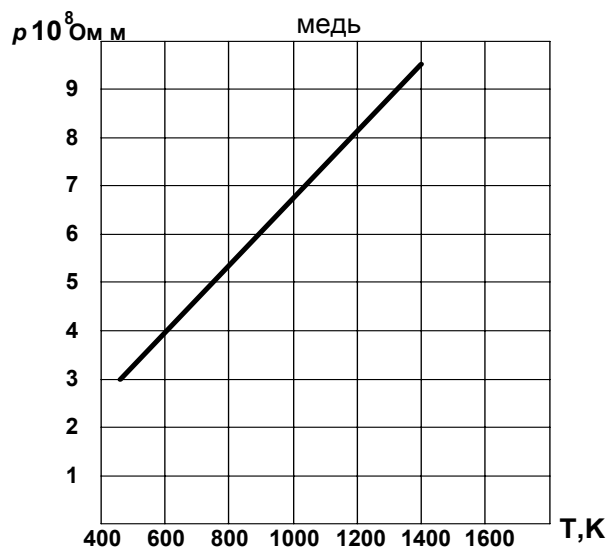
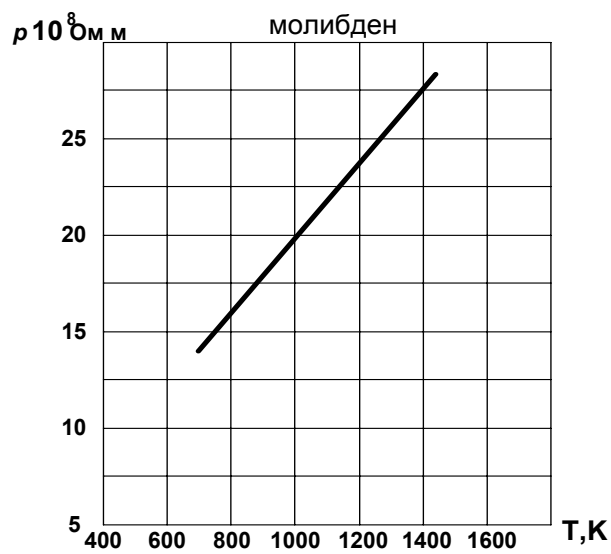
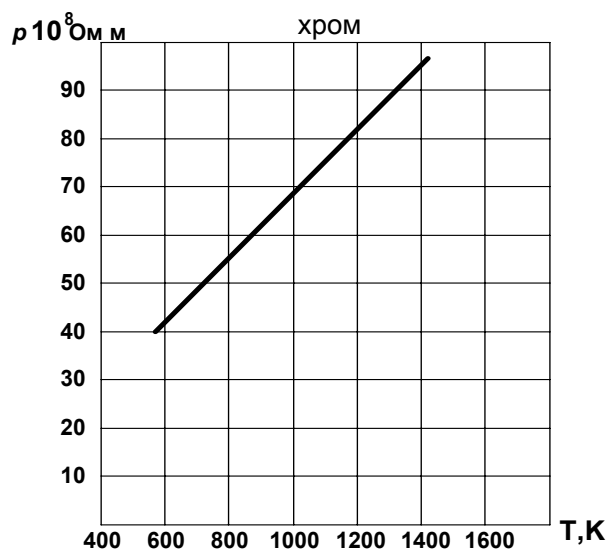
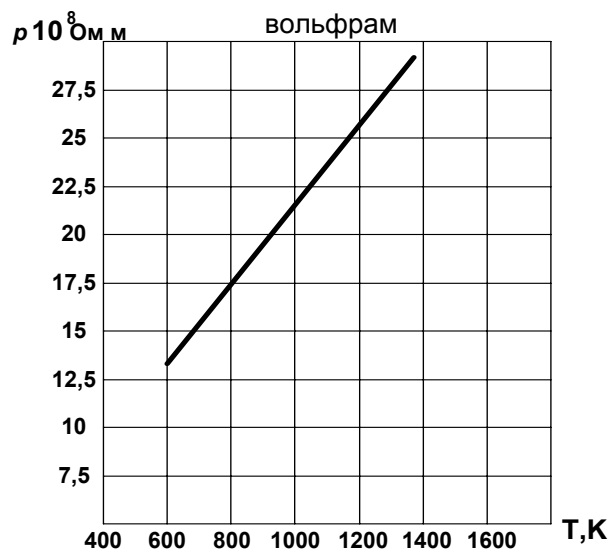
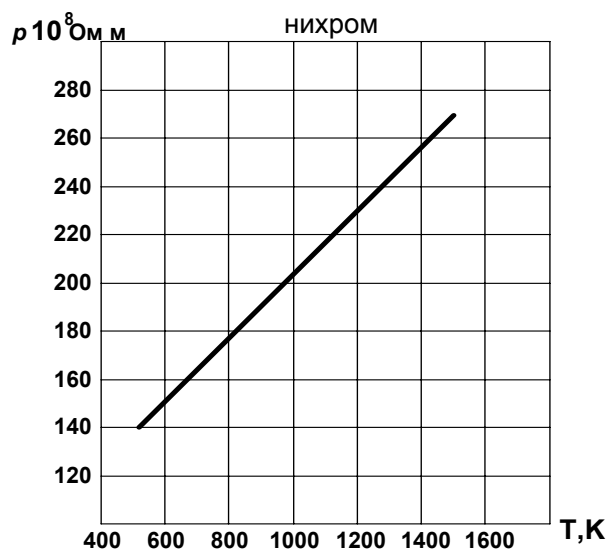


Рис. 8.3 График для определения температуры исследуемой проволоки

[Содержание](#)

ПРИЛОЖЕНИЕ

Градуировочные таблицы термопары хромель-копель (градуировка ХК)

Температура рабочего конца, °С	ТермоЭДС, мВ, температура, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
-90	-5,146	-5,196	-5,246	-5,296	-5,346	-5,396	-5,445	-5,494	-5,543	-5,592
-80	-4,634	-4,686	-4,738	-4,790	-4,841	-4,892	-4,943	-4,994	-5,045	-5,096
-70	-4,106	-4,160	-4,213	-4,266	-4,319	-4,372	-4,425	-4,478	-4,530	-4,582
-60	-3,562	-3,617	-3,672	-3,727	-3,782	-3,836	-3,890	-3,945	-3,999	-4,052
-50	-3,003	-3,059	-3,116	-3,172	-3,228	-3,284	-3,340	-3,396	-3,451	-3,507
-40	-2,429	-2,487	-2,545	-2,603	-2,660	-2,718	-2,775	-2,832	-2,889	-2,946
-30	-1,841	-1,901	-1,960	-2,019	-2,078	-2,137	-2,196	-2,254	-2,313	-2,371
-20	-1,240	-1,301	-1,361	-1,422	-1,482	-1,542	-1,602	-1,662	-1,722	-1,782
-10	-0,626	-0,688	-0,750	-0,812	-0,873	-0,935	-0,996	-1,057	-1,118	-1,179
0	0	-0,063	-0,126	-0,189	-0,252	-0,315	-0,377	-0,440	-0,502	-0,564
0	0	0,063	0,127	0,190	0,254	0,318	0,381	0,445	0,509	0,574
10	0,638	0,702	0,767	0,832	0,896	0,961	1,026	1,091	1,157	1,222
20	1,287	1,353	1,418	1,484	1,550	1,616	1,682	1,748	1,815	1,881
30	1,947	2,014	2,081	2,148	2,214	2,282	2,349	2,416	2,483	2,551
40	2,618	2,686	2,753	2,821	2,889	2,957	3,025	3,094	3,162	3,260
50	3,299	3,367	3,436	3,505	3,574	3,643	3,712	3,781	3,850	3,920
60	3,989	4,059	4,128	4,198	4,268	4,338	4,408	4,478	4,548	4,619
70	4,689	4,760	4,830	4,901	4,972	5,042	5,113	5,184	5,255	5,327
80	5,398	5,469	5,541	5,612	5,684	5,756	5,828	5,899	5,971	6,043
90	6,116	6,188	6,260	6,333	6,405	6,478	6,550	6,623	6,696	6,769
100	6,842	6,915	6,988	7,061	7,135	7,208	7,281	7,355	7,429	7,502
110	7,576	7,650	7,724	7,798	7,872	7,946	8,021	8,095	8,169	8,244
120	8,318	8,393	8,468	8,543	8,618	8,693	8,768	8,843	8,918	8,993
130	9,069	9,144	9,220	9,295	9,371	9,446	9,522	9,598	9,674	9,750
140	9,826	9,902	9,979	10,055	10,131	10,208	10,284	10,361	10,438	10,514
150	10,591	10,688	10,745	10,822	10,899	10,976	11,054	11,131	11,208	11,286
160	11,363	11,441	11,519	11,596	11,674	11,752	11,830	11,908	11,986	12,064
170	12,142	12,221	12,299	12,377	12,456	12,534	12,613	12,692	12,770	12,849
180	12,928	13,007	13,086	13,165	13,244	13,323	13,403	13,482	13,561	13,641
190	13,720	13,800	13,879	13,959	14,039	14,119	14,199	14,278	14,359	14,439
200	14,65	14,73	14,81	14,89	14,98	15,06	15,14	15,22	15,30	15,38
210	15,47	15,55	15,63	15,71	15,79	15,88	15,96	16,04	16,12	16,20
220	16,29	16,37	16,45	16,53	16,61	16,70	16,78	16,86	16,94	17,02
230	17,11	17,19	17,29	17,36	17,44	17,52	17,61	17,69	17,77	17,86
240	17,94	18,02	18,10	18,18	18,27	18,35	18,43	18,51	18,60	18,68
250	18,76	18,84	18,92	19,01	19,09	19,17	19,26	19,34	19,42	19,51
260	19,59	19,67	19,75	19,84	19,92	20,00	20,09	20,17	20,25	20,34
270	20,42	20,50	20,58	20,66	20,74	20,83	20,91	20,99	21,07	21,15
280	21,24	21,32	21,40	21,49	21,57	21,65	21,73	21,82	21,90	21,98
290	22,07	22,15	22,23	22,32	22,40	22,48	22,57	22,65	22,73	22,81
300	22,90	22,98	23,07	23,15	23,23	23,32	23,40	23,49	23,57	23,66
310	23,74	23,83	23,91	24,00	24,08	24,17	24,25	24,34	24,42	24,51
320	24,59	24,68	24,76	24,85	24,93	25,02	25,10	25,19	25,27	25,36
330	25,44	25,53	25,61	25,70	25,78	25,86	25,95	26,03	26,12	26,21
340	26,30	26,38	26,47	26,55	26,64	26,73	26,81	26,90	26,98	27,07

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
350	27,15	27,24	27,32	27,41	27,49	27,58	27,66	27,75	27,83	27,92
360	28,01	28,10	28,19	28,27	28,36	28,45	28,54	28,62	28,71	28,80
370	28,88	28,97	29,06	29,14	29,23	29,32	29,40	29,49	29,58	29,66
380	29,75	29,83	29,92	30,00	30,09	30,17	30,26	30,34	30,43	30,52
390	30,61	30,70	30,79	30,87	30,96	31,05	31,13	31,22	31,30	31,39
400	31,48	31,57	31,66	31,74	31,83	31,92	32,00	32,09	32,18	32,26
410	32,34	32,43	32,52	32,60	32,69	32,78	32,86	32,95	33,04	33,13
420	33,21	33,30	33,39	33,47	33,56	33,65	33,73	33,82	33,90	33,99
430	34,07	34,16	34,25	34,33	34,42	34,51	34,60	34,68	34,77	34,85
440	34,94	35,03	35,12	35,20	35,29	35,38	35,46	35,55	35,64	35,72
450	35,81	35,90	35,98	36,07	36,15	36,24	36,33	36,41	36,50	36,58
460	36,67	36,76	36,84	36,93	37,02	37,11	37,19	37,28	37,37	37,45
470	37,54	37,63	37,71	37,80	37,89	37,98	38,06	38,15	38,24	38,32
480	38,41	38,50	38,58	38,67	38,76	38,85	38,93	39,02	39,11	39,19

[Содержание](#)

Л и т е р а т у р а

1. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С., Теплопередача. – М.: Энергия, 1981.
2. Осипова В.А., Экспериментальное исследование процессов теплообмена. – М: 1969.
3. Авчухов В.В., Паюсте Б.Я., Задачник по процессам теплообмена. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
4. Лабораторный практикум по термодинамике и теплопередаче. / Под ред. Крутова В.И., Шишова Е.В., – М: Высшая школа, 1988.
5. Камке Д., Крамер К., Физические основы единиц измерения. – М: 1980.
6. Осипова В. А., Экспериментальное исследование процессов теплообмена – М: 1969.
7. Краснощеков Е.А., Сукомел А.С., Задачник по теплопередаче. – М.: Энергия, 1981.
8. Теория теплообмена. Исаев С.Н., Кожин И.А., Кофанов В.И. и др.; / Под ред. Леонтьева А.И., – М: Высшая школа, 1997.

[Содержание](#)

С о д е р ж а н и е

Введение

Лабораторная работа ТП – 001 Определение коэффициента теплопроводности плоского слоя методом математического моделирования

Лабораторная работа ТП – 0002 Изучение работы рекуперативного теплообменника методом математического моделирования

Лабораторная работа ТП – 003 Изучение естественной конвекции около горизонтального цилиндра при моделировании процесса теплоотдачи

Лабораторная работа ТП – 004 Исследование естественной конвекции у нагретой вертикальной стенки методом математического моделирования

Лабораторная работа ТП – 005 Теплоотдача при вынужденном движении воздуха в трубе

Лабораторная работа ТП – 006 Теплоотдача при вынужденном поперечном обтекании одиночной трубы

Лабораторная работа ТП – 007 Теплоотдача при кипении воды в большом объеме

Лабораторная работа ТП – 008 Определение коэффициента излучения электропроводящих материалов методом математического моделирования

Приложение

Литература