

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МОРСКОЙ ИНСТИТУТ

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Методические указания
к выполнению лабораторных работ
для студентов специальности
26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок»

В двух частях

Часть 2

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Севастополь
СевГУ
2025

УДК 621.43.016(076.5)

ББК 31.31-5*я73

Т382

Р е ц е н з е н т :

Г. В. Гоголев - канд. техн. наук, доцент кафедры ЭМСС

Составители: К. Ю. Федоровский, В. А. Тимофеев, Н. К. Гриненко

Т382 Техническая термодинамика и теплопередача : методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов специальности 26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок». – В 2-х ч. – Часть 2. Теплопередача / Севастопольский государственный университет, Морской институт ; сост.: К. Ю. Федоровский, В. А. Тимофеев, Н. К. Гриненко. – Севастополь : СевГУ, 2025. – 32 с. – Текст : электронный.

Изучаются основные процессы переноса теплоты, рассматриваются определяющие их протекание факторы и определяются количественные характеристики этих процессов.

Предназначены для студентов очной и заочной форм обучения Севастопольского государственного университета Морского института специальности 26.05.06 – Эксплуатация судовых энергетических установок.

Выполнение лабораторных работ направлено на освоение следующих компетенций:

- ОПК-2. Способен применять естественно-научные и общетехнические знания, аналитические методы в профессиональной деятельности
- ОПК-3. Способен проводить измерения и наблюдения, обрабатывать и представлять экспериментальные данные

УДК 621.43.016(076.5)

ББК 31.31-5*я73

Рассмотрены и рекомендованы к изданию на заседании кафедры «Энергоустановки морских судов и сооружений», протокол № 3 от 31 марта 2023 г.

© Федоровский К. Ю., Тимофеев В. А.,
Гриненко Н. К., сост., 2025

© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Лабораторная работа «Исследование теплопроводности твёрдого тела».....	5
1.1. Цель работы.....	5
1.2. Краткие теоретические сведения.....	5
1.3. Описание экспериментальной установки.....	6
1.4. Порядок проведения работы.....	8
1.5. Расчетные формулы.....	9
1.6. Контрольные вопросы.....	11
2. Лабораторная работа «Исследование теплоотдачи при свободной конвекции».....	12
2.1. Цель работы.....	12
2.2. Краткие сведения из теории и расчетные зависимости.....	12
2.3. Описание экспериментальной установки.....	14
2.4. Порядок проведения работы.....	15
2.5. Контрольные вопросы.....	16
3. Лабораторная работа «Исследование теплоотдачи при вынужденной конвекции».....	17
3.1. Цель работы.....	17
3.2. Краткие сведения из теории и основные расчетные формулы.....	17
3.3. Описание экспериментальной установки.....	20
3.4. Порядок проведения работы.....	20
3.5. Контрольные вопросы.....	24
4. Лабораторная работа «Исследование теплообмена при кипении жидкости».....	25
4.1. Цель работы.....	25
4.2. Краткие сведения из теории и основные расчетные формулы.....	25
4.3. Описание экспериментальной установки.....	27
4.4. Порядок проведения работы.....	28
4.5. Обработка результатов опыта.....	29
4.6. Контрольные вопросы.....	31
Литература.....	32

ВВЕДЕНИЕ

Целью лабораторных работ является закрепление теоретического материала по дисциплине «Техническая термодинамика и теплопередача» (раздел «Теплопередача») и получение практических навыков проведения теплотехнических исследований и обработки полученных результатов.

В ходе занятий студент знакомится с лабораторной установкой, получает допуск к работе, проводит экспериментальные исследования и заполняет таблицу экспериментальных данных, производит их обработку, оформляет результаты исследования в виде отчета и защищает полученные результаты.

Для получения допуска к выполнению работы необходимо:

- иметь оформленный отчет к выполняемой работе;
- знать теорию рассматриваемого процесса;
- знать схему лабораторной установки и порядок проведения опытов.

Отчет должен содержать наименование работы, цель, схему и краткое описание установки, основные расчетные формулы, таблицы с экспериментальными данными и с результатами расчетов, а также необходимые графики и выводы.

Во время защиты лабораторной работы преподаватель проверяет правильность полученных студентом результатов, а также уточняет понимание студентом происходящих процессов.

К каждой лабораторной работе имеются контрольные вопросы, способствующие закреплению теоретического материала при самоподготовке студента.

При выполнении лабораторных работ и подготовке к защите рекомендуется использовать учебную и справочную литературу [1...5].

1. Лабораторная работа

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

1.1. Цель работы

Практическое изучение процессов теплопроводности и получение навыков определения коэффициента теплопроводности твердого тела.

1.2. Краткие теоретические сведения

Теплопроводность – молекулярный процесс переноса теплоты в телах (или между ними), обусловленный переменной температурой в рассматриваемом пространстве.

В газах теплопроводность осуществляется посредством диффузии молекул и атомов в жидкостях и твердых телах (диэлектриках) – посредством упругих волн, в металлах – свободными электронами [1].

Согласно закону Фурье, плотность теплового потока через изотермическую поверхность, пропорциональна градиенту температуры:

$$\bar{q} = -l \overline{grad t}, \quad (1.1)$$

где $q = Q/F$ – плотность теплового потока, Вт/м²; F – площадь поверхности, м²; $\overline{grad t} = \partial t / \partial n$ – градиент температуры – вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температур и численно равный производной от температуры по этому направлению;

l – коэффициент теплопроводности, характеризует тепловой поток, переданный через единицу изотермической поверхности при температурном градиенте, равном единице, Вт/(мК).

Знак «минус» в формуле (1.1) объясняется тем, что вектор плотности теплового потока $\bar{q}$ направлен по нормали к изотермической поверхности в сторону убывания температуры, а градиент – в сторону повышения температуры.

Таким образом, тепловой поток, передаваемый посредством теплопроводности через плоскую однородную стенку с площадью поверхности F , толщиной d при разности температур стенок Δt определяется по формуле

$$Q = l \frac{\Delta t}{d} F \quad \text{Вт.} \quad (1.2)$$

Для однородной цилиндрической стенки формула (1.2) имеет вид

$$Q = \frac{2\pi l L \Delta t}{\ln \frac{d_2}{d_1}}, \text{ Вт} \quad (1.3)$$

где d_1, d_2 – внутренний и наружный диаметры цилиндрической стенки, м;
 L – длина цилиндрической стенки, м.

1.3. Описание экспериментальной установки

В работе исследуется теплопроводность теплоизоляционного материала, имеющего цилиндрическую форму.

Работа выполняется на установке, общий вид которой и схема изображены на рис. 1.1. и рис. 1.2



Рис. 1.1. Экспериментальная установка:

1, 3 – термометры; 2 – труба с электронагревателем; 4 – дифференциальный манометр;
 5 – расходомер переменного перепада давления (диафрагма); 6 – втулка регулирования расхода воздуха; 7 – подвод воздуха от вентилятора; 8 – автотрансформатор;
 9 – ваттметр; 10 – выключатель электропитания стенда; 11 – выключатель электропитания вентилятора; 12 – милливольтметр; 13 – переключатель термопар

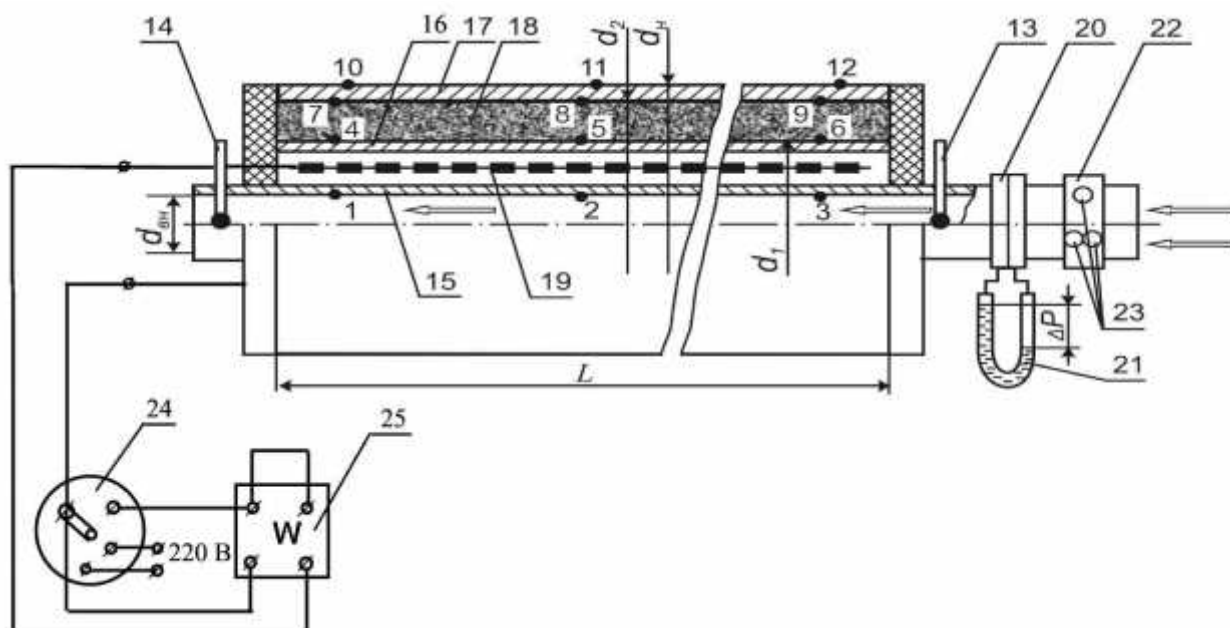


Рис. 1.2. Схема экспериментальной установки:

1...12 – термопары; 13, 14 – термометры; 15, 16, 17 – соответственно внутренняя, промежуточная и наружная трубы; 18 – теплоизоляция; 19 – электронагреватель; 20 – расходомер переменного перепада давления (диафрагма); 21 – дифференциальный манометр; 22 – втулка регулирования расхода воздуха; 23 – отверстия регулировочной втулки; 24 – автотрансформатор; 25 – ваттметр.

$d_1 = 0,06$ м; $d_2 = 0,08$ м; $L = 0,8$ м; $d_{\text{вн}} = 0,03$ м; $d_{\text{н}} = 0,09$ м
степень черноты наружной поверхности $\epsilon = 0,3$

Рабочий участок этой установки состоит из трех concentrically расположенных труб 15, 16 и 17. Между внутренней трубой 15 и промежуточной 16 размещен электронагреватель 19. Между промежуточной 16 и наружной 17 трубами расположен слой исследуемого теплоизоляционного материала 18.

Поскольку при проведении работы полость внутренней трубы 15 закрыта, то практически вся подведенная электронагревателем 19 теплота проходит через теплоизоляционный материал 18.

Температура внутренней и наружной поверхностей слоя изоляционного материала измеряется соответственно термопарами 4, 5, 6 и 7, 8, 9. Числовые значения температур замеряются милливольтметром, который посредством переключателя последовательно соединяется с упомянутыми выше термопарами.

Подводимая к электронагревателю 19 мощность регулируется автотрансформатором и контролируется по ваттметру.

1.4. Порядок проведения работы

- замерить и записать в таблицу температуру окружающего воздуха.
- включить нагреватель и начать прогрев установки до рабочего стационарного режима, указанного преподавателем;
- осуществлять запись показаний ваттметра и термопар 4, 5, 6, 7, 8, 9 в таблицу измерений (табл. 1.1). Показания термопар 10, 11 и 12 записываются по особому указанию преподавателя. Запись показаний повторять с интервалом примерно 5...10 мин до тех пор, пока 2-3 последовательных измерения не будут давать практически постоянные значения величин. Это соответствует стационарному режиму;
- перевести установку на другой рабочий режим, указанный преподавателем;
- по окончании всех замеров выключить электронагреватель и предъявить преподавателю заполненную табл. 1.1.

Т а б л и ц а 1.1

Таблица измерений

№	Время замера	Мощность Q_w , Вт	Показания термопар $E, \mu V / t_i, ^\circ C$									$\bar{t}_{C1}, ^\circ C$	$\bar{t}_{C2}, ^\circ C$
			4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1													
2													
3													
4													
5													
6													

Температура окружающего воздуха $t_\theta = \dots$

Перевод термоЭДС термопар E_1, E_2, E_3 и др. в соответствующую температуру t_1, t_2, t_3 и др. осуществляется следующим образом:

$$t_i = 14,2 \cdot E_i + t_\theta, ^\circ C;$$

Значения средних температур соответственно внутренней и наружной поверхностей теплоизоляционного материала определяются:

$$\bar{t}_{C1} = \frac{t_4 + t_5 + t_6}{3}; \quad \bar{t}_{C2} = \frac{t_7 + t_8 + t_9}{3}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

1.5. Расчетные формулы

Коэффициент теплопроводности изоляционного слоя, имеющего цилиндрическую форму поверхности, определяется из формулы (1.3):

$$\lambda = \frac{Q \ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi L(\bar{t}_{C1} - \bar{t}_{C2})} \text{ Вт/(м·К)}. \quad (1.4)$$

Значение теплового потока, прошедшего через слой изоляционного материала, определяется по зависимости

$$Q = Q_w - Q_{\pi} \text{ Вт}, \quad (1.5)$$

где Q_{π} – тепловые потери через торцовые поверхности экспериментальной установки (принимаются равными 3 % от Q_w).

Изменение температуры t_C по толщине цилиндрической стенки определяется по зависимости

$$t_C = \bar{t}_{C1} - \Delta t_C \frac{\ln \frac{d}{d_1}}{\ln \frac{d_2}{d_1}}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1.6)$$

где $\Delta t_C = \bar{t}_{C1} - \bar{t}_{C2}$ – температурный напор, $^\circ\text{C}$.

Расчеты выполняются в табличной форме (табл. 1.2 и 1.3).

Т а б л и ц а 1.2

Обработка экспериментальных данных

Определяемая величина	Источник или формула	Ед. изм.	Рабочий режим		
			1	2	3
Мощность электрического нагревателя, Q_w	Таблица 1.1	Вт			
Тепловые потери, Q_n	$Q_n = 0,03 Q_w$	Вт			
Тепловой поток, Q	$Q = Q_w - Q_n$	Вт			
Температура внутренней поверхности, $\bar{t}_{c1}$	Таблица 1.1	°C			
Температура наружной поверхности, $\bar{t}_{c2}$	Таблица 1.1	°C			
Средняя температура слоя, t_{cp}	$t_{cp} = 0,5(\bar{t}_{c1} + \bar{t}_{c2})$	°C			
Температурный напор Δt_c	$\Delta t_c = \bar{t}_{c1} - \bar{t}_{c2}$	°C			
Экспериментальное значение коэффициента теплопроводности, λ	Зависимость (1.4)	Вт/(мК)			

По данным табл. 1.2 строятся в одних координатах графики зависимостей $\lambda = f(t_{cp})$ (рис. 1.2. а).

Т а б л и ц а 1.3

**Определение изменения температуры по толщине
цилиндрического слоя материала для режима №_____**

Определяемая величина	Источник или формула	Ед. изм.	Численные значения		
Промежуточный диаметр, d	Задается в пределах от d_1 до d_2	м	d_1		d_2
Температура t_c на промежуточном диаметре	Зависимость (1.7)	°C	$\bar{t}_{c1}$		$\bar{t}_{c2}$

По данным табл. 1.3 строится график зависимости $t = f(d)$ (рис. 1.3, б).

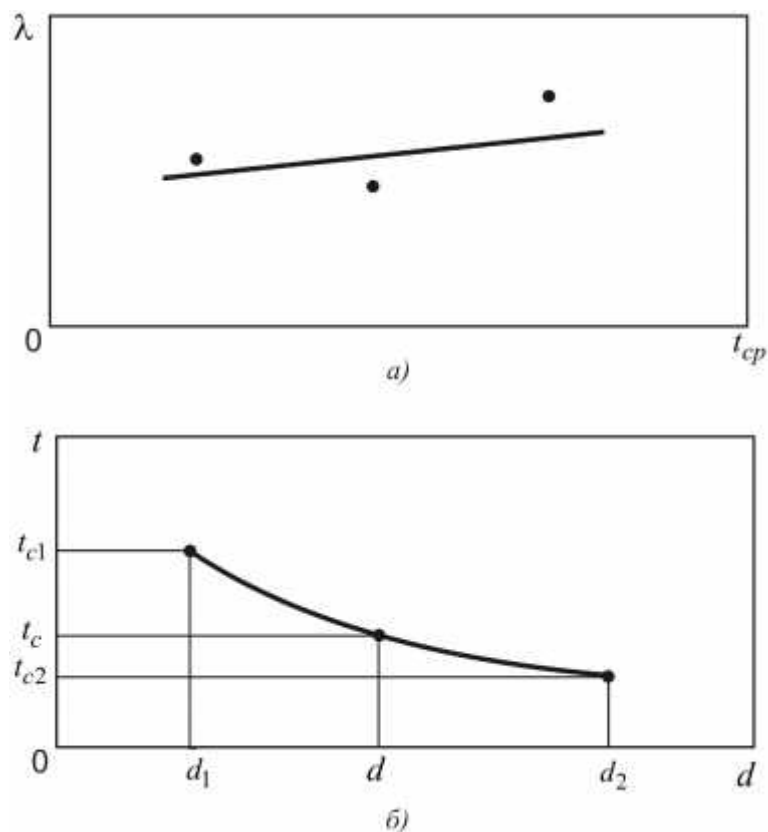


Рис. 1.3. Примеры графических зависимостей $\lambda = f(t_{cp})$ (а) и $t = f(d)$ (б)

1.6. Контрольные вопросы

1. Каковы цель и содержание работы?
2. Как устроена экспериментальная лабораторная установка?
3. Какие величины необходимо измерить, чтобы определить значение λ ?
4. Какова единица измерения коэффициента теплопроводности?
5. Какова последовательность проведения работы?
6. Каковы признаки стационарного режима работы установки?
7. Дать определение температурному полю, изотермической поверхности, изотерме.
8. Что такое градиент температуры?
9. Записать закон Фурье и объяснить наличие знака «минус».
10. Дать определение тепловому потоку и плотности теплового потока. Каков механизм теплопроводности в твердых телах, жидкости и газах?

2. Лабораторная работа ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ

2.1. Цель работы

Практическое изучение процессов теплоотдачи при свободной конвекции и получение навыков определения коэффициента теплоотдачи.

В ходе работы студент знакомится также с лучистым теплообменом и зависимостями для его расчета.

2.2. Краткие сведения из теории и расчетные зависимости

Конвекция – процесс переноса теплоты при перемещении объемов жидкости или газа в пространстве из области с одной температурой в область с другой. При этом перенос теплоты неразрывно связан с переносом самой среды.

Различают свободную и вынужденную конвекцию [1].

Свободная конвекция возникает за счет неоднородного распределения в жидкости или газе массовых (объемных) сил. Такими силами являются сила тяжести, центробежная сила и некоторые другие.

Конвекция всегда сопровождается присутствием теплопроводности теплоты. Перенос теплоты посредством двух указанных процессов называется **конвективным теплообменом**. Конвективный теплообмен между жидкостью (газом) и поверхностью твердого тела называется **конвективной теплоотдачей** или просто **теплоотдачей** [1].

Основной расчетной формулой при конвективной теплоотдаче является зависимость (закон Ньютона – Рихмана):

при $t_c > t_{ж}$

$$Q = a(t_c - t_{ж})F, \text{ Вт} \quad (2.1)$$

при $t_c < t_{ж}$

$$Q = a(t_{ж} - t_c)F, \text{ Вт}$$

где Q – тепловой поток, Вт;

F – площадь теплоотдающей поверхности, м^2 ;

t_c и $t_{ж}$ – соответственно температуры теплоотдающей поверхности тела и окружающей жидкости (стенки), $^{\circ}\text{C}$;

a – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{K})$.

Разность $t_c - t_{ж}$ или $t_{ж} - t_c$ называется температурным напором Δt .

Среднее по поверхности значение коэффициента теплоотдачи определяется по зависимости:

$$\bar{a} = \frac{Q}{(\bar{t}_c - t_{жс})F}, \quad (2.2)$$

где $\bar{t}_c$ – средняя температура поверхности, °С.

Коэффициент теплоотдачи численно характеризует тепловой поток, который передается с единицы поверхности при разности температур между поверхностью и жидкостью в один градус.

Коэффициент a зависит от большого количества факторов: формы и размеров тела, режима течения жидкости, ее температуры, физических свойств жидкости и других параметров. При свободной конвекции с увеличением Δt значение a увеличивается.

В указанной работе исследуется теплоотдача горизонтального цилиндра к воздуху. Характер движения воздуха вдоль поверхности цилиндра показан на рисунке 2.1.

Следует иметь ввиду, что подведенный в установку тепловой поток Q_w передается в окружающее пространство посредством конвективной теплоотдачи Q_k и теплового излучения Q_l . Тогда

$$Q_w = Q_k + Q_l + Q_{\pi}, \quad (2.3)$$

где Q_{π} – потери теплоты через торцевые поверхности (принимаются 3 % от Q_w).

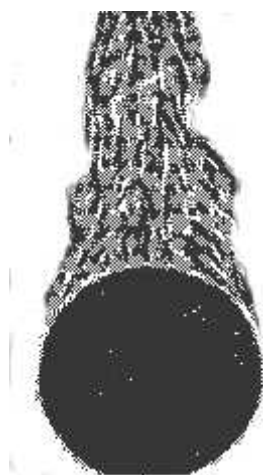


Рис. 2.1. Визуализация свободного движения воздуха около горизонтального цилиндра

Следует иметь ввиду, что подведенный в установку тепловой поток Q_w передается в окружающее пространство посредством конвективной теплоотдачи Q_k и теплового излучения Q_l . Тогда

$$Q_w = Q_k + Q_l + Q_{\pi}, \quad (2.3)$$

где Q_{π} – потери теплоты через торцевые поверхности (принимаются 3 % от Q_w).

Экспериментальное значение среднего коэффициента теплоотдачи определяется по зависимости

$$\bar{a} = \frac{Q_w - Q_k - Q_{\pi}}{F(\bar{t}_c - t_0)}, \quad (2.4)$$

где F – площадь поверхности трубы, m^2 .

Значение Q_l определяется по зависимости:

$$Q_l = e \cdot c_0 \cdot F \left[\left(\frac{\bar{T}_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right], \quad (2.5)$$

где $\bar{T}_c$ и T_0 – температуры соответственно стенки (соответствует d_n) и воздуха, °K; $e = 0,3$ – степень черноты поверхности трубы; $c_0 = 5,7 \text{ Вт/(м}^2\text{K}^4)$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Расчеты для каждого рабочего режима выполняются в табличной форме (см. табл. 2.2).

2.3. Описание экспериментальной установки

В работе исследуется теплоотдача при свободной конвекции от горизонтального цилиндра в окружающий воздух.

Работа выполняется на установке, схема которой показана на рис. 1.1. Детальное описание установки выполнено в предыдущей лабораторной работе. Дополнительно отметим, что на наружной поверхности цилиндра 17 расположены термопары 10, 11 и 12. Подведенный с помощью электронагревателя 19 тепловой поток, пройдя слой изоляции 18, отводится с наружной поверхности цилиндра 17 в окружающее пространство. Измерение показаний термопар производится аналогично работе 1. Измерение температуры окружающего воздуха осуществляется термометром.

Подводимая к электронагревателю 19 мощность регулируется автотрансформатором и контролируется по ваттметру.

Диаметр наружной поверхности цилиндра $d_n = 0,09$ м, длина цилиндра $L = 0,8$ м, степень черноты поверхности цилиндра $\epsilon = 0,3$.

2.4. Порядок проведения работы

- включить нагреватель и прогреть установку до рабочего стационарного режима, указанного преподавателем;
- на рабочем режиме записать в таблицу измерений (табл. 2.1) температуру окружающего воздуха, показания ваттметра и термопар 10, 11 и 12. Запись показаний повторять с интервалом примерно 5...10 мин до тех пор, пока 2-3 последовательных измерения не будут давать практически постоянные значения измеряемых величин;
- перевести установку на другой рабочий режим, указанный преподавателем;
- после выполнения всех замеров выключить электронагреватель и предъявить преподавателю заполненную таблицу измерений 2.1.

Т а б л и ц а 2.1

Таблица измерений

№	Время замера	Мощность нагревателя, Q_w , Вт	Показания термопар ЭДС, $\mu V / t_i$, °C			Среднее значение температуры, $\bar{t}_c$, °C	Температура воздуха, t_0 , °C
			10	11	12		
1							
2							
...							
7							

Среднее значение температуры поверхности стенки $\bar{t}_c$ определяется по формуле

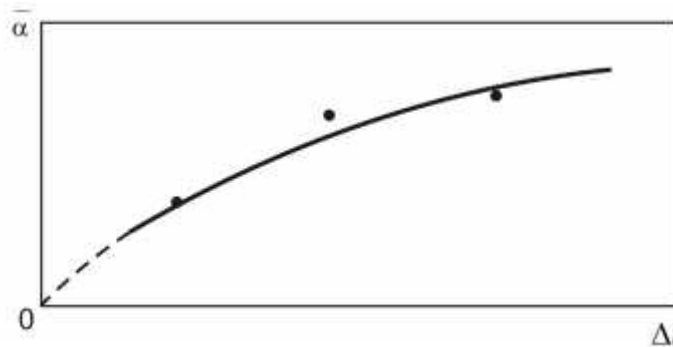
$$\bar{t}_c = \frac{t_{c10} + t_{c11} + t_{c12}}{3}.$$

Т а б л и ц а 2.2

Обработка опытных данных

Определяемая величина	Источник или формула	Ед. изм.	Рабочий режим		
			1	2	3
Мощность электрического нагревателя, Q_w	Таблица 2.1	Вт			
Тепловые потери, Q_{π}	$Q_{\pi} = 0,03Q_w$	Вт			
Средняя температура стенки, $\bar{t}_c$	Таблица 2.1	°С			
Температура воздуха, t_0	Таблица 2.1	°С			
Площадь поверхности трубы, F	$F = \pi d_n L$	м ²			
Лучистый тепловой поток, $Q_{\text{л}}$	Зависимость (2.5)	Вт			
Температурный напор, Δt	$\Delta t = \bar{t}_c - t_0$	°С			
Опытное значение коэффициента теплоотдачи, $\bar{\alpha}$	Зависимость (2.4)	Вт/(м ² К)			

По данным табл. 2.2 строится зависимость $\bar{\alpha} = f(\Delta t)$ (рис. 2.2).

Рис. 2.2. Пример графической зависимости $\bar{\alpha} = f(\Delta t)$ **2.5. Контрольные вопросы**

1. Каковы цель и содержание работы?
2. Как устроена экспериментальная установка?
3. Какие величины необходимо определить для нахождения α ?
4. Какова последовательность проведения работы?
5. Дать определение понятия «конвекция», «конвективный теплообмен», «свободная и вынужденная конвекция».
6. Что такое конвективная теплоотдача?
7. Записать закон Ньютона – Рихмана.
8. Как влияет при свободной конвекции значение температурного напора на коэффициент теплоотдачи?
9. Как учитывается теплообмен излучением при выполнении лабораторной работы?

3. Лабораторная работа

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

3.1. Цель работы

Практическое изучение процессов теплоотдачи при вынужденной конвекции и получение навыков определения коэффициента теплоотдачи.

3.2. Краткие сведения из теории и основные расчетные формулы

В отличие от свободной конвекции, вынужденная конвекция происходит под действием поверхностных сил. Движение жидкости или газа вдоль теплоотдающей поверхности осуществляется посредством внешних сил (работа насоса, воздушного нагнетателя и т.д.).

При обтекании жидкостью поверхности у этой поверхности вследствие действия сил вязкости образуется тонкий слой заторможенной жидкости (рис. 3.1), в пределах которого скорость изменяется от нуля на поверхности до скорости невозмущенного потока (вдали от поверхности). Этот слой называется гидродинамическим пограничным слоем. По ходу движения жидкости, обтекающей поверхность, толщина этого слоя увеличивается, что приводит к ухудшению теплоотдачи.

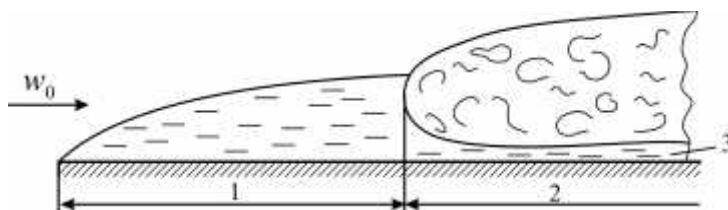


Рис. 3.1. Структура гидродинамического пограничного слоя
1 – ламинарный участок; 2 – турбулентный участок; 3 – ламинарный подслой

Пограничный слой на своем начальном участке имеет ламинарное течение, которое далее переходит в турбулентный пограничный слой, однако, при этом непосредственно у стенки сохраняется тонкий слой жидкости с ламинарным течением – ламинарный подслой.

В данной работе исследуется теплоотдача от внутренней поверхности цилиндрической трубы к движущемуся в ней воздуху.

Теплоотдача при вынужденной конвекции описывается также, как и при свободной конвекции, законом Ньютона – Рихмана:

$$Q = \bar{\alpha}(\bar{t}_c - \bar{t}_b)F, \text{ Вт.} \quad (3.1)$$

где Q – тепловой поток, Вт; $\bar{\alpha}$ – средний по поверхности коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²К); $\bar{t}_c$ – средняя по поверхности температура стенки, °С; $\bar{t}_в$ – средняя температура воздуха в трубе, °С.

Величина коэффициента теплоотдачи α существенно зависит от теплофизических свойств жидкости (газа), режима течения жидкости, ориентации и формы теплоотдающей поверхности и т.д.

На рисунке 3.2 показана эпюра распределения скорости при движении газа (жидкости) внутри трубы. На расстоянии $l_{нг}$ от входа в трубу пристенные пограничные слои смыкаются, а предшествующий участок называется гидродинамическим начальным участком.

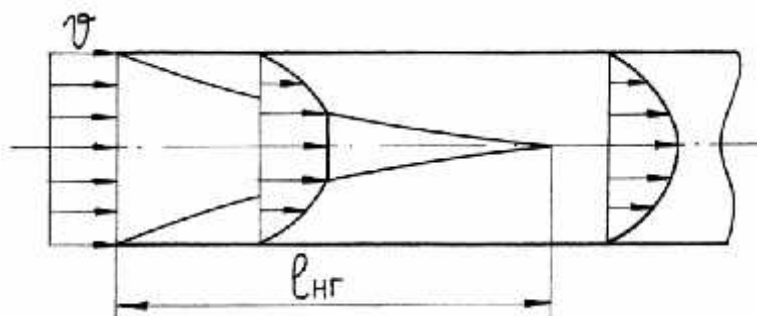


Рис. 3.2. Эпюра распределения скорости по длине трубы

Толщина пристенного пограничного слоя существенно влияет на теплоотдачу. Наибольшее значение коэффициента теплоотдачи достигается вначале трубы (рис. 3.3.).

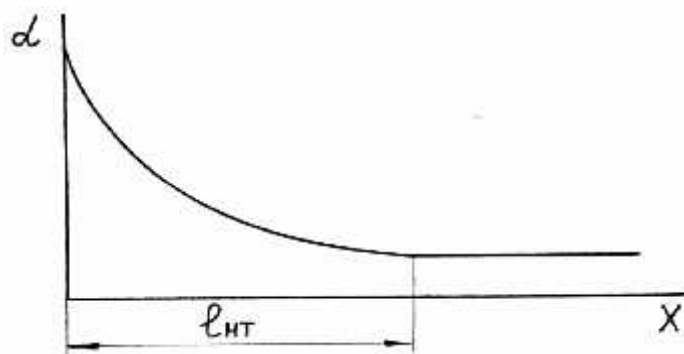


Рис. 3.3. Изменение коэффициента теплоотдачи по длине трубы

На интенсивность теплоотдачи в трубе существенное влияние оказывает характер течения жидкости (ламинарный или турбулентный). При турбулентном режиме обеспечиваются более высокие значения α . О режиме течения жидкости в трубе судят по значению числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{dw}{n}, \quad (3.2)$$

где d – внутренний диаметр трубы, м; w – скорость жидкости в трубе, м/с; n – коэффициент кинематической вязкости, м²/с.

Подведенный к установке тепловой поток Q_w передается потоку движущегося воздуха Q_k и частично теряется через тепловую изоляцию в окружающую среду $Q_{и}$:

$$Q_w = Q_k + Q_{и}, \text{ Вт.}$$

Экспериментальное значение среднего по поверхности коэффициента теплоотдачи определяется по зависимости:

$$\bar{\alpha} = \frac{Q_w - Q_{и}}{F(\bar{t}_c - \bar{t}_B)}, \quad (3.4)$$

где F – площадь внутренней теплоотдающей поверхности трубы, м²; $\bar{t}_B$ – средняя температура воздуха в трубе, °С; $\bar{t}_c$ – средняя температура стенки трубы, °С.

$$\bar{t}_B = 0,5(t'_B + t''_B). \quad (3.5)$$

где t'_B и t''_B соответственно температуры входа и выхода воздуха, °С.

Значение теплотерь $Q_{и}$ через тепловую изоляцию определяется по зависимости

$$Q_{и} = \frac{2\pi l I_{и} (\bar{t}_{c1} - \bar{t}_{c2})}{\ln(d_2 / d_1)}. \quad (3.6)$$

Значение $I_{и}$ принимается по результатам опытного определения коэффициента теплопроводности теплоизоляционного материала (см. работу № 1).

Зависимость для расчета расхода воздуха по показаниям дифманометра имеет вид

$$G_B = B \sqrt{h_1 - h_2} \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3.7)$$

где $B = 1,67 \cdot 10^{-3}$; $h_1 - h_2$ – перепад давления, мм. вод. ст.

Расчеты необходимо выполнять в табличном виде (табл. 3.2).

Значение $h_1 - h_2$ определяется по дифференциальному манометру 21 (рис. 1.1. и 1.2).

3.3. Описание экспериментальной установки

В работе исследуется теплоотдача при движении воздуха внутри трубы. Работа выполняется на установке, схема которой показана на рис. 1.2.

Детальное описание установки выполнено в лабораторной работе 1.

Дополнительно отметим, что воздух прокачивается через трубу 15 посредством нагнетателя. На входном патрубке установлена регулирующая втулка 22, позволяющая за счет своего поворота изменить расход воздуха посредством отвода части его через отверстия 23. Далее воздух проходит через диафрагму 20, перепад давления на которой измеряется жидкостным дифманометром 21. На входе и выходе трубы 15 расположены термометры 13 и 14 для измерения температуры воздуха. На внутренней поверхности трубы расположены термопары 1, 2 и 3, измеряющие температуру внутренней поверхности трубы.

Измерение подводимой тепловой мощности и показаний термопар производится аналогично лабораторным работам 1 и 2.

Внутренний диаметр трубы $d_{\text{вн}} = 0,03$ м, длина трубы $l = 0,8$ м, диаметр $d_1 = 0,06$ м, $d_2 = 0,08$ м.

3.4. Порядок проведения работы

- включить нагнетатель воздуха и затем нагреватель. Установить заданную преподавателем мощность нагревателя;
- на рабочем режиме записать в таблицу измерений (табл. 3.1), показания ваттметра, температур воздуха на входе и выходе, показания термопар 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 и 9 и показания дифманометра. Запись показаний повторять с интервалом примерно 5...10 мин до тех пор, пока 2...3 последовательных измерения не будут давать практически постоянные значения величин;
- перевести установку на другой рабочий режим, указанный преподавателем;
- по окончании всех замеров выключить нагреватель, а затем, через 10...15 мин, выключить нагнетатель воздуха;
- заполненную табл. 3.1 предъявить преподавателю.

Т а б л и ц а 3.1

Таблица измерений

№	Мощность электронагревателя Q_w , Вт	Температура воздуха		Температура внутренней поверхности трубы, $E_c, \mu V / t_c, ^\circ C$				Температура внутренней поверхности тепловой изоляции, $E_{c1}, \mu V / t_{c1}, ^\circ C$				Температура наружной поверхности тепловой изоляции, $E_{c2}, \mu V / t_{c2}, ^\circ C$				Показания дифманометра, мм.вод.ст	
		ВХОД $t'_B, ^\circ C$	ВЫХОД $t''_B, ^\circ C$	1	2	3	средняя	4	5	6	средняя	7	8	9	средняя	h_1	h_2
1																	
2																	
3																	
4																	

Температура окружающего воздуха $t_e = \dots$

Перевод термоЭДС термопар E_1, E_2, E_3 и др. в соответствующую температуру t_1, t_2, t_3 и др. осуществляется следующим образом.

$$t_i = 14,2 \cdot E_i + t_B, ^\circ C;$$

Значения средних температур соответственно внутренней и наружной поверхностей теплоизоляционного материала определяются:

$$\bar{t}_{c1} = \frac{t_4 + t_5 + t_6}{3}; \quad \bar{t}_{c2} = \frac{t_7 + t_8 + t_9}{3}, ^\circ C.$$

Т а б л и ц а 3.2

Обработка экспериментальных данных

Определяемая величина	Источник или формула	Ед. изм.	Рабочий режим		
			1	2	3
Мощность электронагревателя Q_w	таблица 3.1	Вт			
Средняя температура t_{c1}	таблица 3.1	°С			
Средняя температура t_{c2}	таблица 3.1	°С			
Коэффициент теплопроводности изоляции $\lambda_{и}$	по результатам работы 1	$\frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot \text{К})}$			
Теплопотери $Q_{и}$ через тепловую изоляцию	зависимость 3.6	Вт			
Теплоотвод в исследуемую трубу	$Q_w - Q_{и}$	Вт			
Средняя температура воздуха	$\bar{t}_B = 0,5(t'_B + t''_B)$	°С			
Площадь теплоотдающей поверхности F	$F = p d_{BH} l$	м^2			
Экспериментальное значение $\bar{a}$	$\bar{a} = \frac{Q_w - Q_{и}}{F(t_c - \bar{t}_B)}$	$\frac{\text{Вт}}{(\text{м}^2 \cdot \text{К})}$			
Коэффициент теплопроводности воздуха λ	по таблице 3.3	$\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$			
Число Нуссельта	$Nu = \frac{d_{BH} \cdot \bar{a}}{\lambda}$	—			
$\lg Nu$	$\lg Nu$	—			
Площадь поперечного сечения трубы f	$f = \frac{p \cdot d_{BH}^2}{4}$	м^2			
Расход воздуха G_B	$G_B = B \sqrt{h_1 - h_2}$	$\text{м}^3/\text{с}$			
Скорость воздуха w	$w = \frac{G_B}{f}$	$\text{м}/\text{с}$			
Коэффициент кинематической вязкости воздуха ν_B	по таблице 3.3	$\text{м}^2/\text{с}$			
Число Re	$Re = \frac{d_{BH} w}{\nu_B}$	—			
$\lg Re$	$\lg Re$	—			

Т а б л и ц а 3.3

Теплофизические свойства воздуха при атмосферном давлении

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120
$\lambda \cdot 10^2$, Вт/ (м·К)	2,44	2,51	2,58	2,65	2,72	2,79	2,86	2,92	2,99	3,06	3,12	3,24
$\rho \cdot 10^6$, м ³ /с	13,8	14,7	15,6	16,6	17,6	18,6	19,6	20,7	21,7	22,8	23,9	26,2
γ , кг/м ³	1,25	1,21	1,17	1,13	1,10	1,06	1,03	1,00	0,97	0,94	0,92	0,87

Значения теплофизических свойств воздуха определяется по $\bar{t}_s$. Для промежуточных, указанным в таблицах, значений температуры выполняется интерполяция.

По данным таблицы 3.2 строятся графики зависимостей $\bar{a} = f(v_s)$ (рис. 3.4 а) и $\lg Nu = f(\lg Re)$ (рис. 3.4 б).

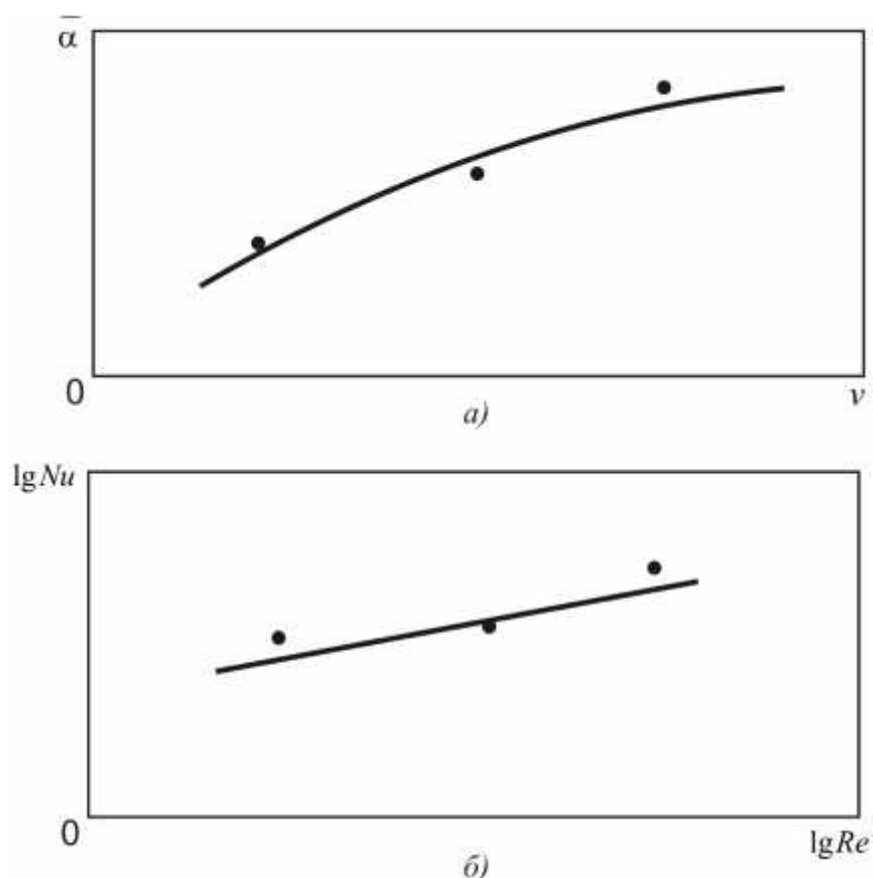


Рис. 3.4. Примеры графических зависимостей $\bar{a} = f(v_s)$ (а) и $\lg Nu = f(\lg Re)$ (б)

3.5. Контрольные вопросы

1. Каковы цель и содержание лабораторной работы?
2. Как устроена экспериментальная лабораторная установка?
3. Какие величины необходимо определить для нахождения α , и какова последовательность выполнения работы?
4. Дать определение вынужденной конвекции.
5. Каковы особенности течения при движении жидкости вдоль плоской поверхности и внутри трубы?
6. Как влияет на теплоотдачу толщина пограничного слоя и режим его течения?
7. Что такое ламинарный подслой?
8. Записать закон Ньютона – Рихмана.
9. Как изменяется теплоотдача по длине трубы?

4. Лабораторная работа

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОСТИ

4.1. Цель работы

Практическое изучение процессов теплообмена при поверхностном кипении и получение навыков определения количественной характеристики этих процессов.

4.2. Краткие сведения из теории и основные расчетные формулы

Кипением называется процесс интенсивного парообразования, происходящего во всем объеме жидкости, перегретой относительно температуры насыщения, с образованием паровых пузырей (рис. 4.1) [1].

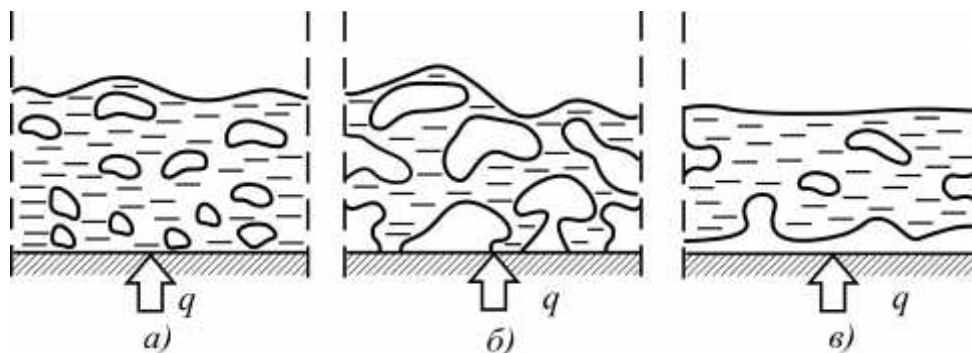


Рис. 4.1. Режимы кипения жидкости в неограниченном объеме

Наиболее часто в технике встречается поверхностное кипение. При таком кипении центрами парообразования являются неровности поверхности (шероховатости). Кипению способствуют наличие в жидкости пузырьков воздуха, инородных частиц и т.д.

Различают три режима кипения: пузырьковый (а), переходный (б) и пленочный (в). Пузырьковый режим кипения обеспечивает большие теплоотводы от поверхности, поскольку при этом, по сравнению с пленочным режимом кипения, обеспечивается контакт поверхности с водой. При пленочном режиме между стенкой и водой находится паровая пленка, что резко ухудшает теплоотвод.

На рисунке 4.2 показана зависимость отводимой от поверхности плотности теплового потока q от температурного напора Δt :

$$\Delta t = t_c - t_n,$$

где t_c – температура стенки, °С;

t_n – температура насыщения, °С.

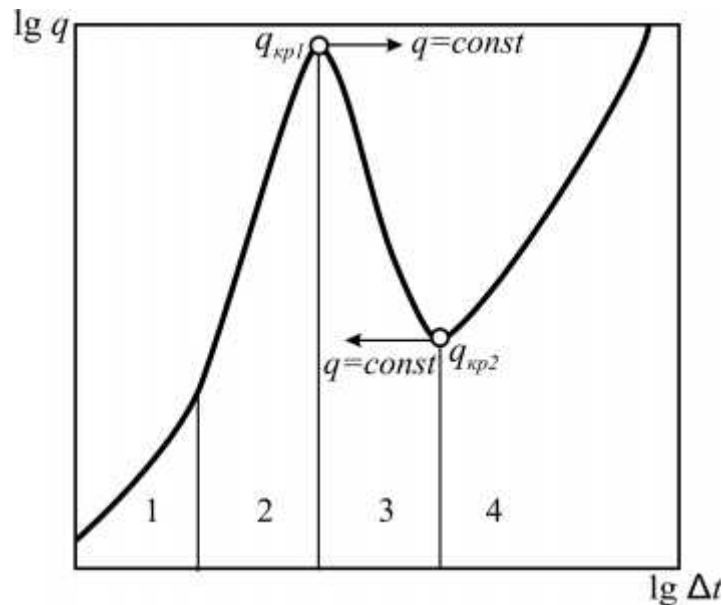


Рис. 4.2. Зависимость плотности теплового потока q от температурного напора Δt между стенкой и жидкостью

Участок 1 соответствует прогреву жидкости до температуры насыщения. На участке 2 наблюдается пузырьковый режим кипения, 3 – переходный режим, 4 – пленочный режим. Точки $Kp1$ и $Kp2$ называются критическими. Так, для воды при обычных условиях точка $Kp1$ соответствует $q = 1,2 \cdot 10^6$ Вт/м² и $\Delta t = 25 \dots 35$ °С, а точка $Kp2$ соответствует $q = (2 \dots 5) \cdot 10^4$ Вт/м² и $\Delta t \approx 150$ °С.

Процесс теплоотдачи при кипении отличается сложностью. Поэтому с целью упрощения расчетов кипение часто условно связывают как бы с эквивалентной теплоотдачей при вынужденной конвекции. В этом случае используется уравнение подобия вида:

$$Nu_* = C \cdot Re_*^n \cdot Pr^{1/3}, \quad (4.1)$$

где $Nu_* = \frac{\bar{a} \cdot l_*}{\lambda}$ – модифицированное число Нуссельта; $Re_* = K_* \cdot q$ – модифицированное число Рейнольдса; K_* – коэффициент, м²/Вт.

В качестве определяющей температуры взята температура насыщения. Характерным линейным размером является условная величина l_* , зависящая, в частности, от критического радиуса пузырька. Значения l_* и K_* находятся по специальным таблицам и графикам. В формуле (4.1) при $Re_* \leq 0,01$ $C = 0,0625$, $n = 0,5$; при $Re_* > 0,01$ $C = 0,125$, $n = 0,65$.

Коэффициент теплоотдачи

$$\bar{a} = \frac{q}{\Delta t}, \text{ Вт/(м}^2\text{К)}. \quad (4.2)$$

Только для воды также может быть использована более простая эмпирическая зависимость:

$$\bar{a} = 4,45 \cdot P^{0,15} \cdot q^{0,7}, \quad (4.3)$$

где q – плотность теплового потока, Вт/м²; P – давление, МПа.

4.3. Описание экспериментальной установки

Схема лабораторной установки показана на рис. 4.4. Герметичный сосуд 1 заполнен водой. В сосуде размещена поверхность нагрева (кипения) 2, выполненная в виде горизонтальной цилиндрической трубки. Электрический нагреватель 10 располагается внутри этой трубки.

В нижней части сосуда 1 размещены трубка 3 и дополнительный нагреватель 11, предназначенные для более быстрого прогрева воды до температуры насыщения. В верхней части сосуда 1 размещена охлаждающая поверхность 9, выполненная в виде U-образной трубки, по которой прокачивается холодная вода. На этой трубке осуществляется конденсация образовавшегося в сосуде пара (отвод теплоты).

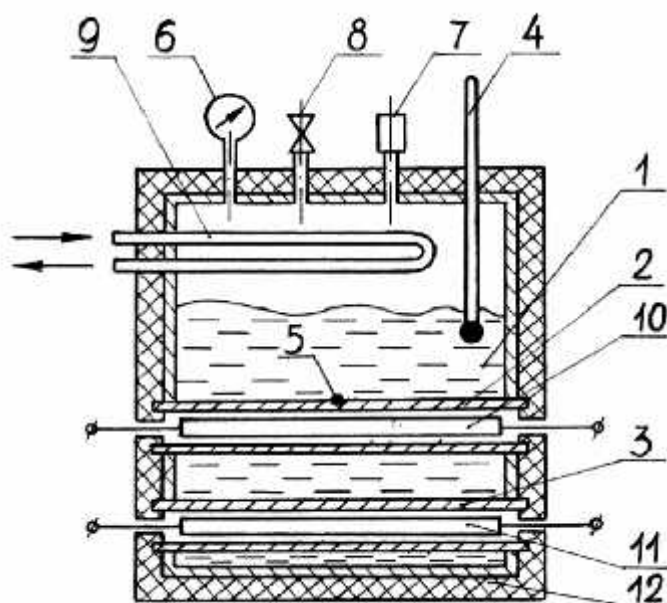


Рис. 4.4. Схема экспериментальной установки:

- 1 – сосуд; 2 – горизонтальная цилиндрическая поверхность кипения; 3 – трубка дополнительного нагрева; 4 – термометр; 5 – термопара; 6 – манометр; 7 – предохранительный клапан; 8 – воздушный клапан; 9 – охлаждающая поверхность; 10, 11 – электронагреватели; 12 – теплоизоляция

Для визуального наблюдения за процессом образования пузырьков на поверхности трубы 2 в корпусе сосуда 1 выполнено смотровое окно и

обеспечена дополнительная подсветка. Температура наружной поверхности нагрева 2 измеряется термопарой 5. Температура воды замеряется термометром 4. Давление в сосуде контролируется по манометру 6.

Мощность электронагревателя регулируется при помощи автотрансформатора и контролируется по ваттметру.

Для уменьшения теплопотерь в окружающую среду сосуд 1 теплоизолирован.

4.4. Порядок проведения работы

- проверить наличие в сосуде 1 (см. рис. 4.4) воды до уровня, покрывающего трубку нагревателя 2. В противном случае обратиться к преподавателю, с целью долива воды;
- включить электронагреватель на заданную преподавателем мощность. При достижении температуры насыщения записать в таблицу измерений (табл. 4.1) показания манометра 6, термопары 5, термометра 4, ваттметра и температуру окружающей среды (температуру свободного конца термопары). Указанные параметры замерить трижды с интервалом 1...2 мин. Для поддержания стабильности происходящего процесса необходимо периодически включать в работу охлаждающую трубку 9 (по согласованию с преподавателем);
- перевести электрический нагреватель на другой режим работы, указанный преподавателем. Выполнить измерения, указанные в предыдущем пункте;
- по окончании всех замеров выключить электронагреватель и предъявить преподавателю заполненную табл. 4.1.

Т а б л и ц а 4.1

Таблица измерений

№	Время замера	Мощность электронагревателя Q_w , Вт	Давление P , МПа	Темп-ра насыщения t_n , °С	ЭДС термопары E_t , мВ	Темп-ра окружающей среды t_0 , °С	ЭДС свободного конца термопары E_0 , мВ	Темп-ра поверхности нагрева t_c , °С
1								
2								
3								
4								
5								
6								

Размеры цилиндрической поверхности нагрева:
диаметр $d = 30$ мм; длина $l = 200$ мм.

Примечание. Установка может быть укомплектована средствами измерения, позволяющими сразу определить t_c . В этом случае отпадает необходимость заполнения значений E_t , t_0 , E_0 .

ЭДС термопары E_t пропорциональна разности температур между рабочим концом термопары и свободным концом. Поэтому необходимо по значению E_t и использованием градуировочных таблиц термопары (см. табл. 4.3.) определить температуру t , соответствующую E_t , и прибавить к ней t_0 :

$$t_c = t_t + t_0.$$

4.5. Обработка результатов опыта

Поскольку обеспечена теплоизоляция установки, то тепловыми потерями пренебрегают. Тогда

$$q = \frac{Q_w}{F}, \quad (4.4)$$

где F – площадь поверхности теплообмена, m^2 .

Расчеты выполняются в табличной форме (табл. 4.2).

Т а б л и ц а 4.2

Обработка экспериментальных данных

Определяемая величина	Источник или формула	Ед. изм.	Рабочий режим		
			1	2	3
1	2	3	4	5	6
Площадь поверхности теплообмена F	$F = p \cdot d \cdot l$	m^2			
Температура насыщения, t_H	таблица 4.1	$^{\circ}C$			
Температура поверхности, t_C	таблица 4.1	$^{\circ}C$			
Тепловой поток Q_w	таблица 4.1	Вт			
Плотность теплового потока q	зависимость (4.4)	Вт/ m^2			
$lg q$	$lg q$	-			
Температурный напор Δt	$\Delta t = t_C - t_H$	$^{\circ}C$			
$lg \Delta t$	$lg \Delta t$	-			
Опытное значение $\bar{a}$	зависимость (4.2)	$\frac{Вт}{(m^2 \cdot K)}$			
Коэффициент K_*	рисунок 4.5	$m^2/Вт$			
Условная длина l_*	рисунок 4.5	м			
Число Pr	рисунок 4.5	-			
Число Re_*	$K_* \cdot q$	-			
Число Nu_*	зависимость (4.1)	-			

Продолжение таблицы 4.2

1	2	3	4	5	6
Коэффициент теплопроводности λ	при $t_n = 100 \dots 160 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\lambda = 0,685$	$\frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot \text{К})}$	0,685	0,685	0,685
Коэффициент теплоотдачи $\bar{a}_{p1}$	$\bar{a}_{p1} = \frac{Nu_* \cdot l}{l_*}$	$\frac{\text{Вт}}{(\text{м}^2 \cdot \text{К})}$			
Относительная погрешность	$\frac{ \bar{a} - \bar{a}_{p1} }{\bar{a}_{p1}}$	-			
Давление в сосуде P	по таблице водяного пара $P = f(t_n)$	МПа			
Коэффициент теплоотдачи $\bar{a}_{p2}$	зависимость (4.3)	$\frac{\text{Вт}}{(\text{м}^2 \cdot \text{К})}$			
Относительная погрешность	$\frac{ \bar{a} - \bar{a}_{p2} }{\bar{a}_{p2}}$	-			

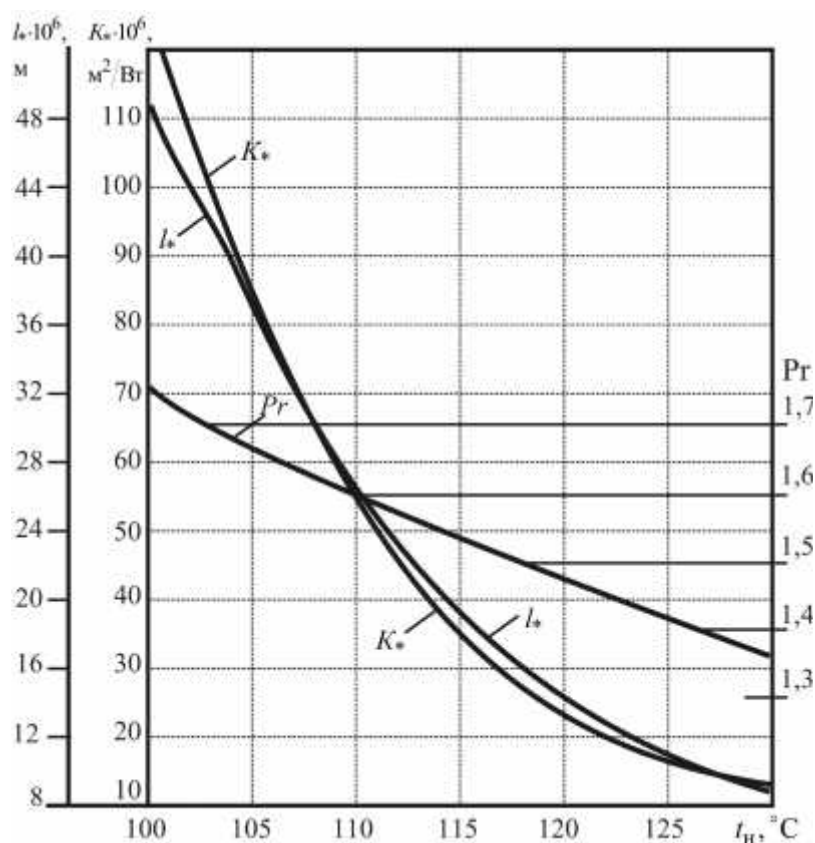


Рис. 4.5. График определения вспомогательных величин при расчете числа Нуссельта по зависимости (4.1)

Т а б л и ц а 4.3

Градуировочные таблицы для термопары хромель-алюмель (Тип К). Диапазон температур 0 °С ...+150 °С. Выходное напряжение термопары приведено в мВ

°С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°С
0	0,000	0,039	0,079	0,119	0,158	0,198	0,238	0,277	0,317	0,357	0,397	0
10	0,397	0,397	0,437	0,477	0,517	0,557	0,597	0,637	0,677	0,718	0,758	10
20	0,798	0,798	0,838	0,879	0,919	0,960	1,000	1,041	1,081	1,122	1,163	20
30	1,203	1,203	1,244	1,285	1,326	1,366	1,407	1,448	1,489	1,530	1,571	30
40	1,612	1,653	1,694	1,735	1,776	1,817	1,858	1,899	1,941	1,982	2,023	40
50	2,023	2,064	2,106	2,147	2,188	2,230	2,271	2,312	2,354	2,395	2,436	50
60	2,436	2,478	2,519	2,561	2,602	2,644	2,685	2,727	2,768	2,810	2,851	60
70	2,851	2,893	2,934	2,976	3,017	3,059	3,100	3,142	3,184	3,225	3,267	70
80	3,267	3,308	3,350	3,391	3,433	3,474	3,516	3,557	3,599	3,640	3,682	80
90	3,682	3,723	3,765	3,806	3,848	3,889	3,931	3,972	4,013	4,055	4,096	90

Продолжение таблицы 4.3

°С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°С
100	4,096	4,138	4,179	4,220	4,262	4,303	4,344	4,385	4,427	4,468	4,509	100
110	4,509	4,550	4,591	4,633	4,674	4,715	4,756	4,797	4,838	4,879	4,920	110
120	4,920	4,961	5,002	5,043	5,084	5,124	5,165	5,206	5,247	5,288	5,328	120
130	5,328	5,369	5,410	5,450	5,491	5,532	5,572	5,613	5,653	5,694	5,735	130
140	5,735	5,775	5,815	5,856	5,896	5,937	5,977	6,017	6,058	6,098	6,138	140
150	6,138	6,179	6,219	6,259	6,299	6,339	6,380	6,420	6,460	6,500	6,540	150

4.6. Контрольные вопросы

1. Каковы цель и содержание лабораторной работы?
2. Как устроена лабораторная установка?
3. Какие величины необходимо измерить, чтобы определить α ?
4. Какова последовательность проведения работы?
5. Какой процесс называется кипением?
6. Что может являться центрами парообразования и что способствует процессу кипения?
7. Каковы возможности роста парового пузырька?
8. Какие режимы кипения жидкости известны?
9. Изобразить график зависимости $\lg q = f(\lg \Delta t)$ и объяснить характер графической зависимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федоровский К. Ю. Теплопередача : учебник для вузов / К. Ю. Федоровский. – Севастополь : СевНТУ, 2012. – 302 с. – Текст : непосредственный.
2. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М. : Энергия, 1987. – 454 с.
3. Промышленные теплообменные процессы и установки / А. М. Бакластов [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 328 с. – Текст : непосредственный.
4. Теплопередача / В. П. Исаченко [и др.]. – М. : Энергоиздат, 1981. – 416 с. – Текст : непосредственный.
5. Справочник по теплообменным аппаратам / П. И. Бажан [и др.]. – М. : Машиностроение, 1989. – 368 с. – Текст : непосредственный.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

*Методические указания
к выполнению лабораторных работ*

В двух частях

Часть 2

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Составители: **Федоровский** Константин Юрьевич,
Тимофеев Вячеслав Алексеевич, **Гриненко** Надежда Константиновна

В авторской редакции

Изд. № 74/2023. Объем 2 п.л. Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 1,96.
Издательский центр ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»