

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Химические технологии нефтегазового комплекса»

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Часть II

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Методические указания к лабораторным занятиям

Ростов-на-Дону

ДГТУ

2019

УДК 66.02/07 (076.5)

Составители: И.Ю. Жукова, И.И. Кашпаров, А.И. Собчинский;

Процессы и аппараты химической технологии. Часть II.
Тепловые процессы: методические указания к лабораторным
занятиям. – Ростов-на-Дону: Донской гос. техн. ун-т, 2019. –
32 с.

Содержат теоретический материал, методики выполнения лабораторных работ, комплекс вопросов для проверки знаний студентов на лабораторных занятиях.

Составлены в соответствии с программой дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии».

Предназначены для студентов направления 18.03.01 Химическая технология очной и заочной форм обучения.

УДК 66.02/07 (076.5)

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Донского государственного технического университета

Научный редактор канд. хим. наук, доцент В.И. Мишуров

Ответственный за выпуск зав. кафедрой «Химические технологии
нефтегазового комплекса» д-р техн. наук, профессор И.Ю. Жукова

В печать 08.02.2019 г.

Формат 60×84/16. Объем 2,0 усл. п. л.

Тираж 50 экз. Заказ № 159.

Издательский центр ДГТУ

Адрес университета и полиграфического предприятия:
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

© Донской государственный
технический университет, 2019

Содержание

Введение	4
Техника безопасности	5
Элементы научных исследований при выполнении студентами лабораторных работ	6
Методические указания к лабораторным работам по гидродинамике.....	9
Лабораторная работа № 8 Практическое применение уравнения Бернулли определения потерь напора в трубопроводах	9
Лабораторная работа № 9 Определение зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры	13
Лабораторная работа № 10 Определение средней изобарной теплоемкости воздуха	17
Лабораторная работа № 11 Изучение физических свойств жидкости	21
Лабораторная работа № 12 Кинетика процесса осаждения	26
Приложение	30
Литература	33

ВВЕДЕНИЕ

Курс «Процессы и аппараты химической технологии» является инженерной дисциплиной, представляющей собой важный раздел теоретических основ химической технологии. В нем изучаются основные процессы и аппараты химических производств, и основные закономерности протекания технологических процессов. Он играет очень важную роль в подготовке студентов химико-технологических специальностей. Эффективность освоения этой учебной дисциплины в значительной мере зависит от содержания и постановки лабораторного практикума.

Настоящее пособие является учебно-методическим руководством для выполнения лабораторных работ по курсу «Процессы и аппараты химической технологии» студентами направления 18.03.01 «Химическая технология». А также для студентов других направлений подготовки, изучающих данную дисциплину.

Лабораторный практикум состоит из двух частей, содержащих по 7 лабораторных работ, являющихся вариациями стандартных работ адаптированных научным коллективом кафедры Химические технологии нефтегазового комплекса Донского государственного технического университета (ДГТУ).

Целью каждой лабораторной работы является более глубокое усвоение материала по соответствующему разделу курса, а также приобретение необходимых навыков при проведении измерений, постановке эксперимента и обработке его результатов.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

Прежде чем приступить к выполнению лабораторных работ,

НЕОБХОДИМО:

1. Пройти инструктаж по технике безопасности и расписаться в соответствующем журнале;
2. Досконально изучить устройство лабораторных стендов;
3. Проверить заземление лабораторных стендов.

СТРОГО ВОСПРЕЩАЕТСЯ:

1. Касаться проводников и неизолированных частей аппаратуры, находящихся под напряжением;
2. Включать в сеть лабораторную установку без разрешения преподавателя и в его отсутствие;
3. Оставлять без наблюдения включенную лабораторную установку;
4. Касаться нагретых поверхностей установок;
5. При работе с насосами превышать установленное давление;
6. Менять регулировку приборов, открывать или закрывать краны установок в отсутствие преподавателя;
7. Загромождать стол лабораторной установки одеждой, портфелями, книгами и другими вещами, не относящимися к работе;
8. Принимать пищу в научной лаборатории.

ЕСЛИ ПРОИЗОШЕЛ НЕСЧАСТНЫЙ СЛУЧАЙ – НЕМЕДЛЕННО:

1. Отключить электропитание лаборатории рубильником;
2. Оказать первую помощь пострадавшему;
3. Вызвать по телефону «03» скорую помощь.

ЭЛЕМЕНТЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ СТУДЕНТАМИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Лабораторные работы студенты выполняют небольшими бригадами от 2 до 4 человек, причем условия эксперимента для каждой бригады изменяются, что не может не сказываться на результате. Это обеспечивает необходимую самостоятельность студентов при работе.

Готовясь к защите лабораторных работ, студенты обязательно отвечают на контрольные вопросы, имеющиеся в тексте методических указаний, т.к. преподаватель ведет опрос в основном по этим же вопросам. Работая с контрольными вопросами, студент должен обращаться к литературе, конспектам лекций, таблицам и диаграммам, он анализирует полученные результаты, связывая их с условиями эксперимента, и сталкивается, таким образом, с элементами научных исследований (ЭНИ).

ПОРЯДОК ДЕЙСТВИЙ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ СТУДЕНТАМИ

При выполнении лабораторных работ студентам рекомендуется следующий порядок действий:

1. Ознакомиться с требованиями техники безопасности.
2. Усвоить цели и задачи работы.
3. Изучить устройство лабораторной установки, порядок выполнения работы (включение и регулирование), методику эксперимента, связь с теоретическими положениями. Подготовить описание установки и журнал наблюдений.
4. Изучить справочную литературу, рекомендуемую к данной лабораторной работе.
5. Отчитаться перед преподавателем о готовности к выполнению работы и получить разрешение на выполнение.
6. Во время проведения опыта, студент, должен выполнить эксперимент, оценивая достоверность и точность каждой измеренной цифры, ее значение в работе в целом.

Пуск установки производится только с разрешения преподавателя и в его присутствии. В процессе проведения опыта каждый студент заносит результаты измерений в свою таблицу наблюдений, которая затем подписывается преподавателем. Таблица наблюдений является основным документом, удостоверяющим участие студента в выполнении работы, и должна сохраняться до получения защиты по этой работе.

7. Показать результаты преподавателю для проверки.
8. Выполнить обработку материалов эксперимента: рассчитать результаты, построить диаграммы или графики, оценить погрешность результатов, обдумав выводы увязать их с имеющимся заданием в работе.

9. Оформить отчет по лабораторной работе на основе инструкции и таблицы наблюдений. Справочные данные имеются в приложении к практикуму, а также в учебниках и справочниках по теплотехнике, процессам и аппаратам химической технологии, органической химии. Отчет должен включать следующие разделы:

- название и номер работы;
- задание с указанием целей работы;
- основные теоретические положения;
- схема экспериментальной установки и ее краткое описание;
- таблица наблюдений;
- математическая обработка опытных данных;
- указанные в задании диаграммы и графики и итоговые таблицы;
- выводы и обобщения.

Отчет следует оформить к следующему лабораторному занятию. При отсутствии отчета студент к выполнению следующей лабораторной работе не допускается.

10. При подготовке к защите отчета, повторно, на более глубоком уровне изучается теоретический материал и лабораторная установка. Особое внимание при этом студенты должны обращать на вопросы взаимной увязки между изучаемым материалом и другими разделами курса. Студенты должны знать ответы на контрольные вопросы.

11. Предъявить отчет преподавателю на проверку.

12. Защитить отчет перед преподавателем.

Защиты по лабораторным работам проводятся непрерывно в течение семестра по мере их выполнения. Работа считается принятой, если она выполнена в соответствии с указаниями настоящего руководства; получены достоверные результаты, и студент при защите обнаружил знание и понимание схемы установки, методики эксперимента, а также соответствующих разделов теории.

Для квалифицированного ответа на поставленные в инструкции контрольные вопросы студент должен не только изучить инструкцию, курс лекций или учебник, но и на основе этого материала уметь делать самостоятельные умозаключения.

Перечень работ и последовательность их выполнения устанавливаются преподавателем, исходя из объема курса, количества часов, предусмотренных учебным планом для этой дисциплины, а также возможностей лаборатории.

ЭЛЕМЕНТЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТАХ ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКЕ, МЕХАНИКЕ И ГИДРОМЕХАНИКЕ:

Лабораторная работа № 8. В ходе выполнения работы студент изучает приборы для измерения давления – важнейшего термодинамического пара-

метра. Строит поправочную кривую для пружинных измерительных приборов. Устанавливает связь между основными единицами измерения давления.

Лабораторная работа № 9. В ходе выполнения работы студент изучает основные приборы для измерения температуры. Находит погрешности определения температуры этими приборами в сравнении с ртутным термометром. Устанавливает взаимосвязь между единицами измерения температуры.

Лабораторная работа № 10. Студент анализирует, зависимость средней изобарной теплоемкости воздуха от его скорости в канале экспериментальной установки. Затем устанавливает взаимосвязь между изобарной и изохорной теплоемкостями воздуха. Сопоставляет справочные и найденные опытные значения.

Лабораторная работа № 11. В ходе выполнения работы студент изучает основные физические свойства жидкости. Приборы для измерения основных свойств жидкости. Сопоставляет справочные и найденные в опыте значения.

Лабораторная работа № 12. Студент изучает кинетику процесса свободного осаждения твердых частиц шарообразной формы под действием силы тяжести. Научится проводить построение графических зависимостей и сравнить его с теоретическими данными. Находит погрешности определения.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ГИДРОДИНАМИКЕ

Лабораторная работа № 8

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ НАПОРА В ТРУБОПРОВОДАХ

Цель работы – ознакомиться с принципами применения уравнения Бернулли, лежащими в основе методов определения напора в трубопроводах и измерения давления потока.

Задание

1. Определить слагаемые уравнения Бернулли при движении реальной жидкости по горизонтальному трубопроводу различного сечения.
2. Определить потери напора для различных участков трубопровода.

Описания экспериментальной установки

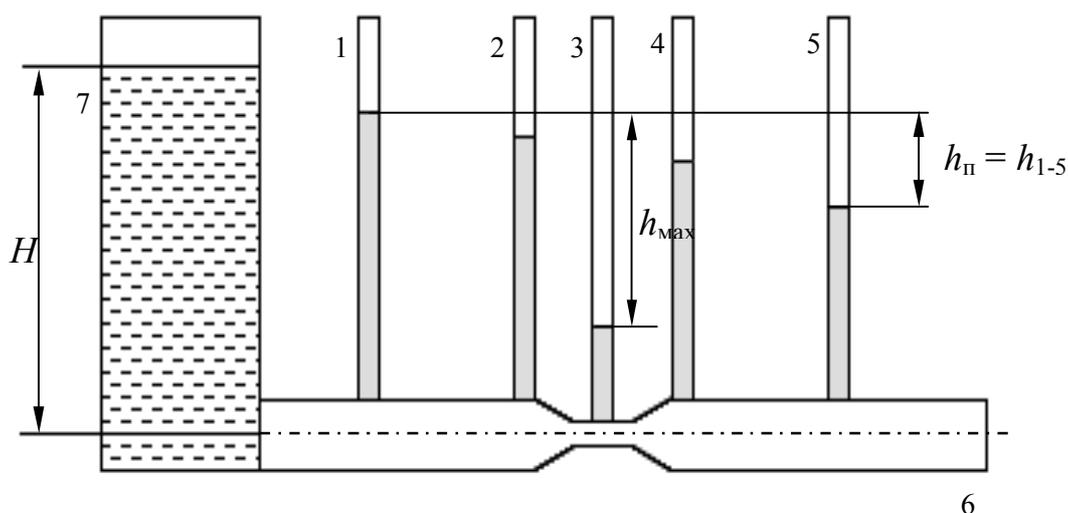


Рис. 1. Экспериментальная установка для определения потерь напора в трубопроводе:

1, 2, 3, 4, 5 – пьезометрические трубки; 6 – трубопровод; 7 – напорный бак; 8, 9 – запорные вентили; 10 – термометр; 11 – бак подпорный; 12 – мерный сосуд; 13 – воронка слива

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рисунке 1. Установка включает пять пьезометрических трубок 1 - 5, для измерения статического давления жидкости в сечениях I, II, III трубопровода 6 с соответствующими диаметрами $d_1 = 32$ мм, $d_2 = 20$ мм, $d_3 = 32$ мм. Элементы трубопровода разного сечения соединены между собой плавными переходами. Напорный бак 7, регулировочный вентиль 8 и запорный вентиль 9. Термометр для регулировки температуры спускаемой воды 10, подпорный бак 11 для

регулировки постоянного уровня жидкости. Мерный сосуд **12** для измерения расхода по фиксации время его заполнения. Сливная воронка для отвода воды **13**.

Порядок выполнения работы

Открыть вентиль **8** для подачи воды в установку и с помощью вентилей **9** установить заданный расход. Последний определяется следующим образом: под струю жидкости, вытекающую из подпорного бака **11**, устанавливается мерный сосуд **12** и фиксируется время его наполнения. После определения расхода необходимо записать показания пьезометрических трубок **1 – 5**.

При одном расходе необходимо сделать несколько замеров через каждые 2 – 3 минуты. Подобные замеры выполняются при 4 – 5 расходах жидкости, все данные необходимо занести в таблицу наблюдений.

Таблица 1.

Таблица наблюдений

N опыта	N замера	Объем вытекшей воды $V_v, \text{м}^3$	Время наполнения сосуда $\tau, \text{сек}$	Температура воды $t, \text{°C}$	Показание пьезометров, мм вод. ст.					
					1	2	3	4	5	
					$\frac{P_1}{\rho g}$	$\frac{P_2}{\rho g}$	$\frac{P_3}{\rho g}$	$\frac{P_4}{\rho g}$	$\frac{P_5}{\rho g}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1.	1.									
	2.									
	3.									
	Ср. знач.									
	...									

Обработка экспериментальных данных

1. Уравнение Бернулли для двух сечений элементарной струйки или потока реальной жидкости описывается уравнением.

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho_1 g} + \frac{\omega_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{\omega_2^2}{2g} + h_{\text{п}}$$

Так как ось лабораторного трубопровода расположенного горизонтально, то $z_1 = z_2$, и данное уравнение примет вид

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{\omega_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\omega_2^2}{2g} + h_{\text{п}}$$

Величина пьезометрического напора не рассчитывается, так как была измерена в ходе проведения работы.

2. Для определения величины скоростного напора необходимо рассчитать расход жидкости V , м³/с, в установке:

$$V = V_B / \tau$$

где V – объем вытекшей воды;

τ – время наполнения сосуда, с.

3. Затем определяют скорость движения жидкости ω , м/с, в сечениях I, II, III трубопровода по уравнению

$$\omega = V/f$$

где f – площадь поперечного сечения трубопровода, м².

4. Полный гидродинамический напор H_1 , м, в сечении I определяют как сумму пьезометрического и скоростного напоров:

$$H_1 = \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\omega_1^2}{2g}$$

Затем аналогично определяют полный гидродинамический напор H_2 и H_3 в сечениях II и III.

5. Потери напора (м) на участках трубопровода между сечениями I и II определяют как разность полных гидродинамических напоров в этих сечениях

$$h_{1-2} = H_1 - H_2$$

и между сечениями I и III

$$h_{1-3} = H_1 - H_3$$

6. Результаты расчетов заносим в таблицу 2.

Таблица 2

Таблица расчетных данных

N опыта	Расход воды V м ³ /с	Средняя скорость воды в рассматри- ваемых сечениях, м/с			Скоростной напор (удельная кинетическая энергия потока), м			Полный гидродинамическ ий напор (полная удельная энергия потока), м			Потери полной удельной энергии, м	
		ω_1	ω_2	ω_3	$\frac{\omega_1^2}{2g}$	$\frac{\omega_2^2}{2g}$	$\frac{\omega_3^2}{2g}$	H_1	H_2	H_3	h_{1-2}	h_{1-3}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1.												
...												

Контрольные вопросы

Вопросы к лабораторной работе.

1. Что является целью работы?
2. Какие задачи необходимо решить в лабораторной работе?
3. Из каких элементов состоит экспериментальная установка?
4. В какой последовательности включаются элементы установки?
5. Какой метод используется для обработки опытных данных в работе?
6. Когда производится запись показаний приборов?
7. Зависят ли показания приборов от окружающей температуры?
8. Как проводится обработка экспериментальных данных?

Дополнительные вопросы при защите работы.

1. Основные понятия гидравлики и физические свойства жидкости.
2. Основное уравнение гидростатики, энергетический смысл составляющих уравнения гидростатики и выводы, которые можно сделать на основе этого уравнения.
3. Практические приложения основного уравнения гидростатики (принцип сообщающихся сосудов, пневматическое измерение количества жидкости в резервуарах, гидростатические машины, давление жидкости на дно и стенки сосуда).
4. Основные характеристики движения жидкостей (например, скорость, расход, гидравлический радиус, эквивалентный диаметр и т.д.).
5. Ламинарный и турбулентный режимы движения жидкости. Опыт Рейнольдса. Основные характеристики режимов.
6. Уравнение неразрывности (сплошности) потока, его физический смысл, практические приложения.
7. Уравнение Бернулли для движения идеальной и реальной жидкости. Какими формами энергии обладает поток жидкости?
8. Практические приложения уравнения Бернулли (принципы измерения скорости и расхода жидкости, истечение жидкостей).
9. Гидравлические сопротивления при движении жидкости в трубопроводах.
10. Чем обусловлены потери напора при движении реальной жидкости в трубопроводах?
11. В чем заключается смысл уравнения Бернулли?
12. Экспериментальное определение гидравлических сопротивлений при движении жидкости в трубопроводах.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДАВЛЕНИЯ НАСЫЩЕННОГО ВОДЯНОГО ПАРА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель работы – опытным путем убедиться в том, что давление насыщенного водяного пара не зависит от занимаемого им объема, а зависит от температуры жидкости из которой он образован.

Задание

1. Определить экспериментальным путем несколько значений давления насыщенного водяного пара при различных температурах.
2. По опытным данным построить в системе координат $P - t$ зависимость давления насыщенного пара от температуры и сравнить её со справочной зависимостью.
3. Убедиться в том, что при неизменной температуре давление насыщенного пара не зависит от объема.

Описания экспериментальной установки

Основным элементом экспериментальной установки (рис. 2) является заполненная водой U -образная трубка **1**. Над уровнем воды в правом колене трубки **1** образуется насыщенный пар, параметры которого и определяются в опыте. Через цилиндр **9**, окружающий правое колено трубки **1**, прокачивается греющая вода из термостата **11**. Расход греющей воды регулируется зажимом **10** на резиновой трубке. Температура насыщенного пара принимается равной температуре греющей воды, которая измеряется ртутным термометром **8**, установленным внутри цилиндра **9**.

Левое колено трубки **1** заканчивается стеклянным баллоном **3**, который через вентиль **2** соединен с вакуумным насосом **12**. С помощью вакуумного насоса в стеклянном баллоне **3** и в экспериментальной трубке создается разрежение, необходимое для образования насыщенного водяного пара при температуре ниже $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. U -образная трубка **6**, заполненная ртутью, служит для измерения разрежения в баллоне. Клапан **7**, одетый с помощью резиновой трубки на верхнюю часть правого колена трубки **1**, служит для удаления из рабочего пространства воздуха, остающегося при заполнении трубки водой. Измерительные рейки **4** и **5** используются для измерения вакуума H_1 и перепада давлений в баллоне **3** и в рабочем пространстве H_2 . Абсолютное давление насыщенного пара, мм рт.ст., как следует из определения разрежения и из устройства установки, следует определять по формуле

$$P_{\text{н}} = B - H_1 + \frac{H_2}{13,6}$$

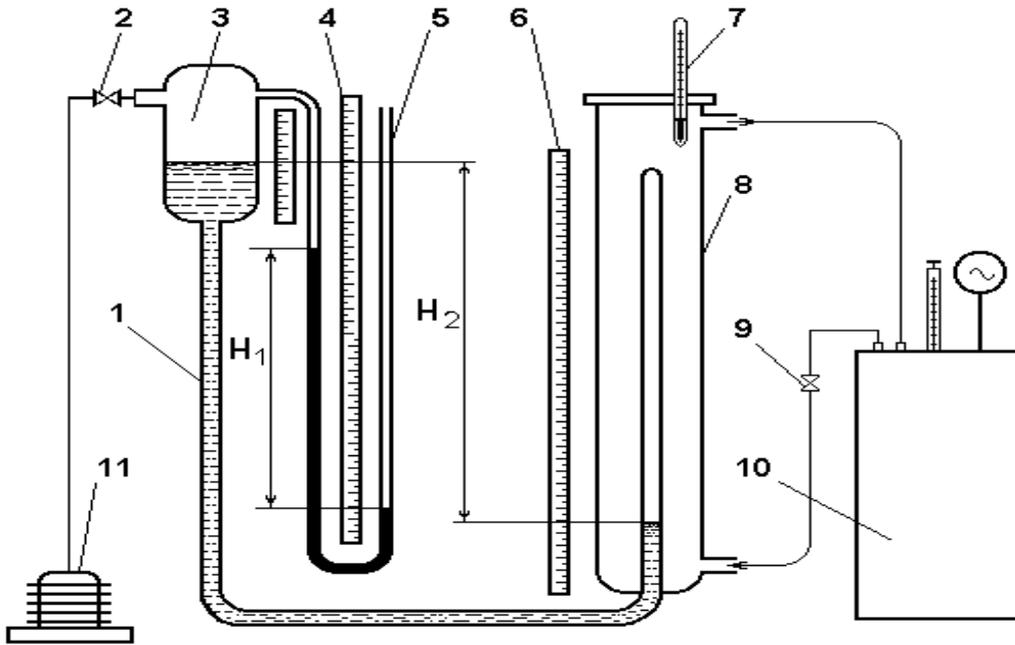


Рис. 2. Экспериментальная установка для измерения давления пара:

1 – заполненная водой *U*-образная трубка; 2 – вентиль, 3 – стеклянный баллон; 4 – измерительная рейка для ртутного столба; 5 – заполненная ртутью *U*-образная трубка; 6 – измерительная рейка для водяного столба; 7 – ртутный термометр, 8 – цилиндр для прокачки воды из термостата; 9 – зажим для регулировки греющей воды; 10 – термостат; 11 – вакуумный насос.

Атмосферное давление B измеряется ртутным барометром, установленным в лаборатории. При этом поправку на температуру брать не следует, т.к. результирующая высота ртутного столба ($B-H_1$) получается небольшой. Конструкция установки позволяет изменять объем пара в рабочем пространстве изменяя его давления. При впуске воздуха в баллон 3, увеличение абсолютного давления в баллоне (слагаемое $B-H_1$ в предыдущей формуле в известных пределах может компенсироваться уменьшением перепада давлений в трубке 1 (слагаемое $H_2/13,6$).

Порядок выполнения работы

Контактный термометр термостата устанавливается на значение температуры, которое желательно иметь в первом опыте, а именно 70 °С. Включается нагреватель термостата и насос, подающий воду в цилиндр 9. Расход воды с помощью зажима 10 регулируется так, чтобы уровень воды в цилиндре 9 установился несколько выше клапана 7, но не приближался к краю цилиндра, т.к. сверху цилиндр не уплотнен. После достижения заданного значения температуры открывается вентиль 2, включается вакуумный насос и производится откачка воздуха из баллона 3 до тех пор, пока уровень воды в

правом колене трубки 1 не начнет опускаться. С этого момента необходимо, прикрывая вентиль 2, обеспечить не слишком большую скорость понижения уровня воды в трубке 1. Когда этот уровень приблизится к нижнему обрезу цилиндра 9, вентиль 2 следует полностью закрыть и выключать вакуумный насос. Затем необходимо выждать несколько минут, пока уровень воды не перестанет изменяться. Это служит признаком того, что в рабочем пространстве установилось равновесие между водой и паром. После этого измеряются величины, указанные в приводимой ниже таблице наблюдений.

Второй опыт проводится при неизменной температуре воды в термостате и уменьшенном объеме пара. С этой целью необходимо, приоткрывая вентиль 2, установить уровень в правом колене трубки 1 примерно на середине рейки 5. Переход к третьему и четвертому опытам заключается в повышении приблизительно на 5 °С температуры в термостате, причем уровень воды в трубке 1 поддерживается неизменным с помощью вентиля 2.

Таблица 3.

Таблица наблюдений

Величина		Размерность	Значения в опытах			
Наименование	Обозначение		1	2	3	4
Температура насыщенного пара	t_n	°С				
Разность уровней ртути в трубке (6)	H_1	мм рт.ст.				
Разность уровней воды в трубке (1)	H_2	м вод.ст.				
Атмосферное давление	B	мм рт.ст.				

Обработка экспериментальных данных

1. Вычисление значений абсолютного давления пара для всех опытов производится по формуле:

$$P_n = B - H_1 + \frac{H_2}{13,6}$$

2. В координатах $P-t$ строится справочная кривая по уравнению, справедливому в диапазонах температур 50...100 °С:

$$P_{н.сп.} = 750 \cdot \exp(124,69 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - (123,3/t)) .$$

На этот же графике производим построение по экспериментальным точкам.

3. Для точки, наиболее удаленной от справочной кривой, вычисляем относительную погрешность:

$$\Delta = \frac{P_{\text{спр}} - P_{\text{оп}}}{P_{\text{спр}}} \cdot 100 \%$$

4. По результатам работы делаем выводы.

Контрольные вопросы

Вопросы к лабораторной работе

1. Что является целью работы?
2. Какие задачи необходимо решить в лабораторной работе?
3. Из каких элементов состоит экспериментальная установка?
4. В какой последовательности включаются элементы установки?
5. Какой метод используется для обработки опытных данных в работе?
6. Когда производится запись показаний приборов?
7. Зависят ли показания приборов от окружающей температуры?
8. Как проводится обработка экспериментальных данных?

Дополнительные вопросы при защите работы

1. Что такое насыщенный пар?
2. Что такое перегретый пар?
3. Укажите, в каких состояниях находится вещество в характерных точках диаграммы $P - t$ для воды.
4. Можно ли, меняя объем насыщенного пара при постоянной температуре, изменить его давление?
5. Равны ли в точности температуры насыщенного пара и греющей воды в экспериментальной установке?
6. От чего зависит давление для насыщенного пара?
7. От чего зависит температура для насыщенного пара?
8. Может ли жидкость иметь температуру больше температуры насыщения для заданного давления при $P < P_{\text{кр}}$?
9. Может ли жидкость иметь температуру меньше температуры насыщения для заданного давления при $P < P_{\text{кр}}$?
10. Может ли пар иметь температуру больше температуры насыщения для заданного давления при $P < P_{\text{кр}}$?
11. Что является переменной величиной во втором опыте?
12. Какие состояния вещества находятся в области 1, 2, 3 графика $P=f(t)$, полученного экспериментальным путем?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТОДОМ СТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ЧЕРЕЗ ПЛОСКУЮ СТЕНКУ

Цель работы – ознакомиться с физическими принципами, определения коэффициента теплопроводности плоской стенки стационарным методом.

Задание

1. Экспериментальным путем найти коэффициент теплопроводности плиты из гетинакса.
2. Сравнить полученное значение со справочным.

Описания экспериментальной установки

Основным элементом экспериментальной установка (рис. 3) является прибор, состоящий из стакана **1** и латунного диска **6**, между которыми расположен испытуемый материал – гетинаксовая пластина **9** толщиной $\delta = 2,5$ мм и диаметром рабочей части $d = 100$ мм. Стакан **1** примерно до половины заполнен водой. На дне его расположена спираль электродвигателя **19**. Латунный диск **6** имеет внутренние каналы **5**, по которым циркулирует охлаждающая вода. Полость **8** между диском **6** и образцом испытуемого материала **9**, образованная прокладкой **4**, заполнена легкоплавким сплавом Вуда (висмут-свинец-олово), температура плавления которого равна 70 °С. Высокая теплопроводность сплава Вуда способствует выравниванию температуры по всей поверхности пластины **9**, так что для её определения достаточно изменить температуру лишь в точке соприкосновения спая **7** термопары **11** с гетинаксовой пластиной. Второй спай **18** этой термопары помещен в воду, залитую в стакан.

Во время опыта вода кипит, и её температура равна температуре насыщения t_n при давлении пара в стакане. Такую же температуру имеет и нижняя поверхность гетинаксовой пластины - $t_{c1} = t_n$, на которой конденсируется пар. Происходит это потому, что коэффициент теплоотдачи при конденсации чистого водяного пара весьма высок ($\alpha \approx 10000$ Вт/(м²·К)). Чтобы в стакане находился пар без примесей неконденсирующихся газов (воздуха), предусмотрен продувочный клапан **10**. Таким образом, термоЭДС термопары **E**, соответствующая разности температур холодного и горячего спая термопары, дает возможность судить об искомой разности температур между поверхностями пластины $t_{c1} - t_{c2}$. ТермоЭДС термопары измеряется потенциометром **12**, а избыточное давление пара в стакане *U*-образным ртутным манометром **2**. Питание электродвигателя осуществляется от автотрансформатора **14**. В цепь нагревателя включены вольтметр **16**, амперметр **15** и стабилизатор питания **13**. Охлаждающая вода подается в каналы **5** диска **6** насосом термостата **3**. Для уменьшения потерь тепла в окружающую среду стакан **1** покрыт тепловой изоляцией **17**.

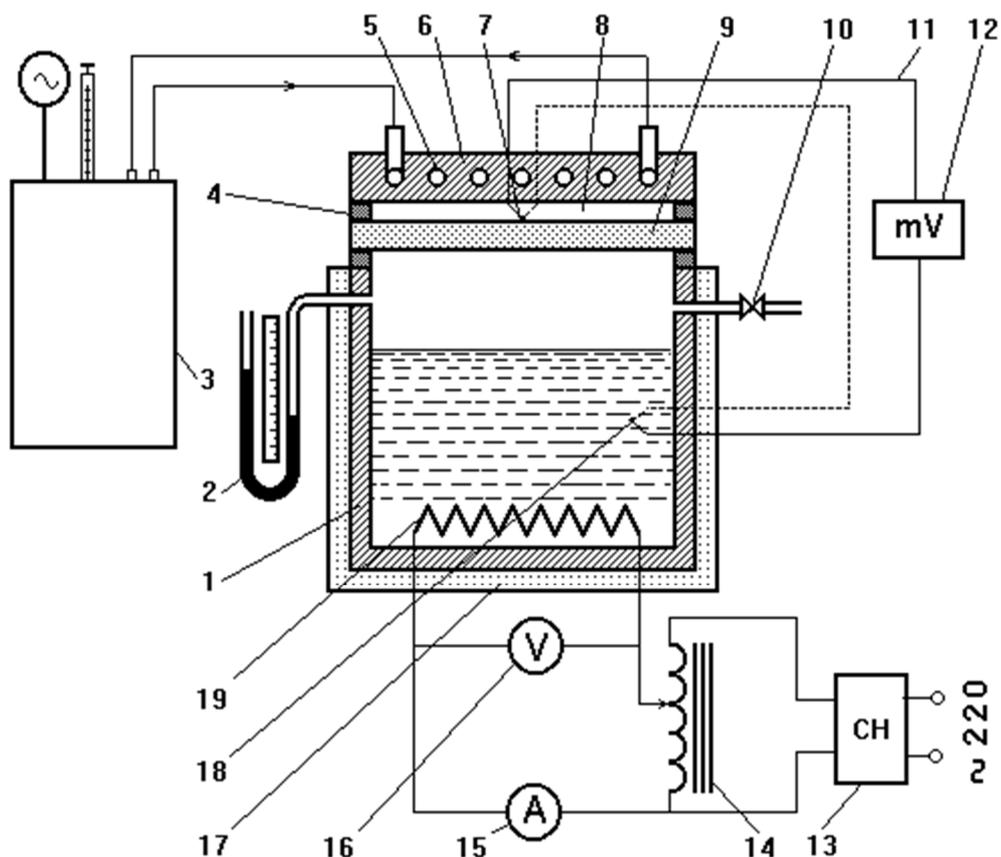


Рис. 3. Экспериментальная установка для определения коэффициента теплопроводности методом стационарного теплового потока через плоскую стенку:

1 – стакан; 2 – ртутный манометр; 3 – термостат; 4 – прокладки; 5 – каналы для прокачки термостатированной жидкости; 6 – латунный диск; 7, 18 – спай термопары; 8 – полость, заполненная легкоплавким сплавом Вуда; 9 – испытуемый образец; 10 – продувочный кран; 11 – термопара; 12 – милливольтметр; 13 – стабилизатор напряжения; 14 – автотрансформатор; 15 – амперметр; 16 – вольтметр; 17 – тепловая изоляция; 19 – электрический нагреватель

Порядок выполнения работы

Включить термостат **3**, нагреть в нем воду до $\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$ и подать её в прибор. При этом сплав Вуда в полости **8** расплавится. Включить электронагреватель **19**, установив с помощью автотрансформатора его мощность на уровне ~ 200 Вт. Продувочный кран **10** при нагреве воды должен быть открыт. После закипания воды (о чем свидетельствуют колебания уровня ртути в U -образном манометре **2**) постепенно снизить мощность нагревателя так, чтобы избыточное давление в нагревателе $P_{изб}$ не превышало 10 мм рт.ст. После появления пара из крана **10** продолжать продувку нагревателя в течение 5 мин. Медленно закрыть продувочный кран **10**, регулируя при этом мощность нагревателя так, чтобы избыточное давление в стакане было равно $P_{изб} \approx 5$ мм рт.ст. В это время ни в коем случае нельзя оставлять прибор без наблюдения т.к. при колебаниях

мощности возможен выброс ртути из манометра **2**. Через каждые две минуты измерять термоЭДС термопары E потенциометром **12** и мощность нагревателя P амперметром **15** и вольтметром **16**, записывая показания приборов в таблицу наблюдений. Когда три очередные замера дадут примерно одинаковые значения E и P , опыт считается законченным. Открыть продувочный кран **10** и выключить нагреватель и термостат.

Таблица 4

Таблица наблюдений

Величина		Размерность	Значения в опытах			Среднее значение
Наименование	Обозначение		1	2	3	
Падение напряжения на нагревателе	U	B				
Ток нагревателя	I	A				
ТермоЭДС термопары	E	mB				

Обработка экспериментальных данных

1. Усредненные значения E , мВ, и P , Вт, для трех последних опытов

$$E = \frac{1}{3}(E_1 + E_2 + E_3); \quad P = \frac{1}{3}(I_1U_1 + I_2U_2 + I_3U_3),$$

где E_i , I_i , U_i - показания приборов в i -том опыте ($i = 1, 2, 3$).

2. Тепловой поток Q , Вт,

$$Q = P - P_n,$$

где P_n - потери тепла через боковую поверхность и дно стакана. Для условий опыта $P_n = 20$ Вт.

3. Разность температур на поверхностях пластины Δt , °С, находится по аналитической формуле по усредненному значению

$$E = f(\Delta t).$$

4. Коэффициент теплопроводности λ рассчитывается по формуле.

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} F(t_{c1} - t_{c2})$$

где $F = \pi d^2/4$ - теплообменная поверхность образца.

5. Погрешность измерения λ , %,

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda - \lambda_{ср}}{\lambda_{ср}} \cdot 100,$$

где $\lambda_{\text{спр}} = 0,20 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ - справочное значение коэффициента теплопроводности гетинакса. В выводах по работе объясните возможные причины погрешности измерений.

Контрольные вопросы

Вопросы к лабораторной работе

1. Что является целью работы?
2. Какие задачи необходимо решить в лабораторной работе?
3. Из каких элементов состоит экспериментальная установка?
4. В какой последовательности включаются элементы установки?
5. Какой метод используется для обработки опытных данных в работе?
6. Когда производится запись показаний приборов?
7. Зависят ли показания приборов от окружающей температуры?
8. Как проводится обработка экспериментальных данных?

Дополнительные вопросы при защите работы

1. Что такое коэффициент теплопроводности?
2. От чего зависит коэффициент теплопроводности?
3. Каковы единицы измерения коэффициента теплопроводности?
4. Какой метод измерения коэффициента теплопроводности используется в данной работе?
5. Можно ли этим методом, используемым в данной работе определить теплопроводность жидкости?
6. Как измеряются в опыте температуры поверхностей образца?
7. Почему недопустимо наличие воздуха в паровом пространстве стакана?
8. Какие процессы называются тепловыми?
9. Что является движущей силой тепловых процессов?
10. Объясните явление теплопроводности?
11. Какие Вы знаете виды переноса теплоты?
12. Дайте формулировку коэффициента теплопроводности?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА НЕСТАЦИОНАРНЫМ МЕТОДОМ ШАРА

Цель работы – ознакомиться с физическими принципами, определения коэффициента теплопроводности шаровой стенки нестационарным методом.

Задание

1. Определить экспериментально значения коэффициентов температуропроводности Q и теплопроводности λ шамотного кирпича.
2. Найти значения полного коэффициента теплоотдачи α конвекцией и лучеиспусканием от поверхности шара в окружающую среду.
3. Сопоставить справочные и найденные в опыте значения Q и λ и оценить погрешность их измерения.

Описания экспериментальной установки

Основными элементами экспериментальной установки (рис. 4) являются шар 1, выполненный из шамотного кирпича, и муфельная электропечь 3, расположенная над шаром на штативе. Шар оснащен двумя хромель-алюмелевыми термопарами - 5 и 6. Горячий спай 2 термопары 5 расположен в центре шара и служит для измерения температуры $t_{ц}$. Горячий спай 4 термопары 6 используется для измерения температуры поверхности шара $t_{п}$. Холодные спаи 8 и 10 термопар находятся при температуре окружающего воздуха $t_{ж}$, определяемой по показаниям ртутного термометра 9.

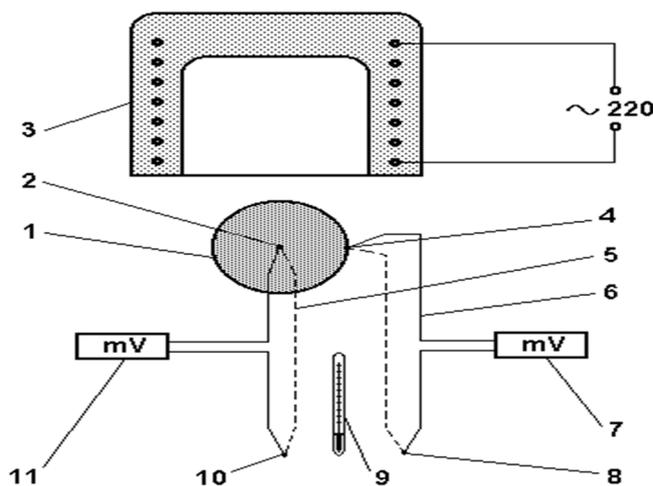


Рис. 4. Экспериментальная установка для определения коэффициента теплопроводности нестационарным методом шара:

1 – шар из шамотного кирпича; 2, 4 – горячие спаи термопар; 3 – муфельная электропечь; 5, 6 – хромель-алюмелевые термопары; 7, 11 – милливольтметры; 8, 10 – холодные спаи термопар; 9 – ртутный термометр

В рассечку электродов термопар присоединены цифровые милливольтметры 7 и 11. Они служат для определения термоЭДС термопар, по которым далее находятся значения t_n и t_c . Следует иметь в виду, что поскольку холодные спаи термопар находятся при температуре воздуха $t_{ж}$ термоЭДС термопар соответствует избыточным температурам центра $\Delta t_c = t_c - t_{ж}$ и поверхности $\Delta t_n = t_n - t_{ж}$, отсчитываемым не от 0 °С, а от температуры воздуха $t_{ж}$.

Радиус шара равен $R = 0,0344$ м, плотность и теплоемкость шамота составляют соответственно $\rho = 1805$ кг/м³ и $C = 1090$ Дж/(кг·К).

Порядок выполнения работы

Перед проведением опытов печь следует опустить так, чтобы шар оказался внутри муфеля, и затем включить электронагреватель. Шар нагревается в печи до тех пор, пока его температура не выровняется по всему объему и не наступит равенство $\Delta t_c = \Delta t_n$. Эта температура принимается в качестве начальной Δt_0 и соответствует началу отсчета времени $\tau = 0$. По окончании прогрева печь поднимают, а шар отводят в сторону, чтобы исключить излучение муфеля на шар, который после подъема печи начинает охлаждаться, отдавая тепло в окружающую среду конвекцией и излучением. В процессе охлаждения замеряют термоЭДС термопар E_c и E_n , соответствующие температурам Δt_c и Δt_n через 5, 10 и 15 мин. после начала опыта. Результаты измерений заносят в таблицу наблюдений.

Таблица 5

Таблица наблюдений

Величина		Размерность	Значения в опытах			
Наименование	Обозначение		0	1	2	3
Время от начала опыта	τ	с				
ТермоЭДС термопары центра шара	E_c	мВ				
ТермоЭДС термопары поверхности шара	E_n	мВ				
Температура окружающего воздуха	$t_{ж}$	°С				

Обработка экспериментальных данных

При обработке опытных данных для 1-го, 2-го и 3-го опыта определяются следующие величины:

1. Избыточные температуры в центре Δt_c и на поверхности Δt_n пара, °С, рассчитываются по приближенному уравнению градуировочной кривой хромель-алюмелевой термопары:

$$\Delta t_c = 24,35E_c; \quad \Delta t_n = 24,35E_n.$$

2. Относительные избыточные температуры центра $\theta_{ц}$ и поверхности $\theta_{п}$ шара вычисляются по выражениям:

$$\theta_{ц} = \Delta t_{ц} / \Delta t_{ц0}; \quad \theta_{п} = \Delta t_{п} / \Delta t_{п0}$$

3. На номограмме, представленной на рис. 5, для каждого опыта находится точка пересечения линий, соответствующих опытным значениям $\theta_{ц}$ и $\theta_{п}$. По этой точке графически определяются значения чисел F_0 и Bi .

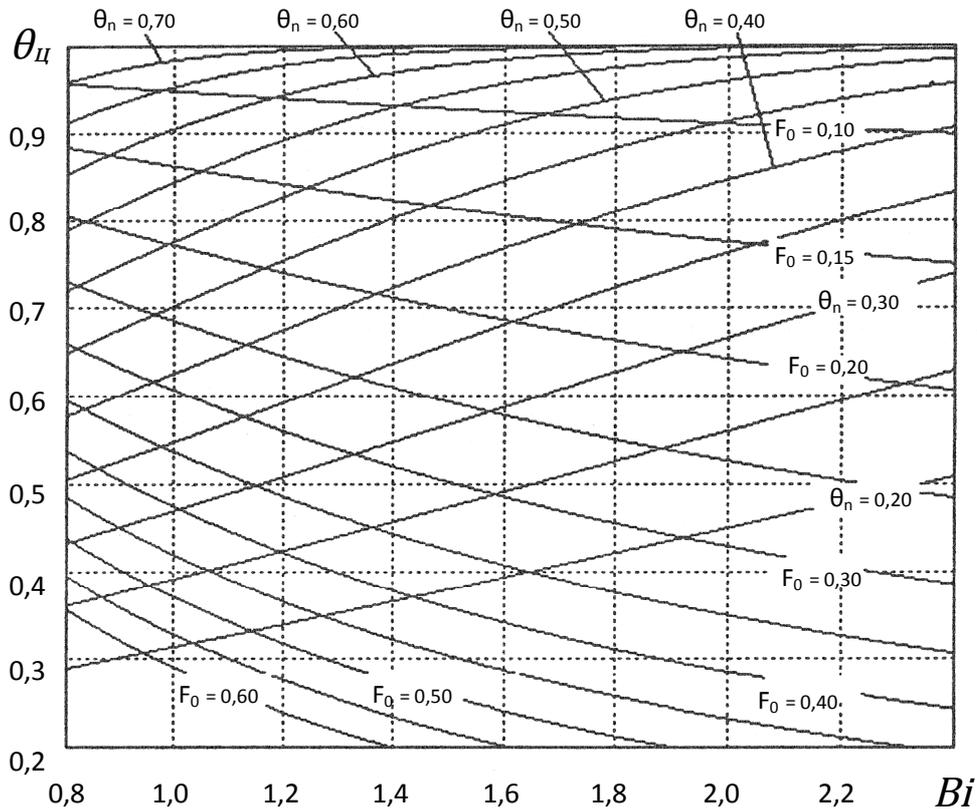


Рис. 5. Номограмма отношения числа Bi и температур $\theta_{ц}$ или $\theta_{п}$

4. Коэффициенты температуропроводности шамота Q , m^2/s , его теплопроводности λ , $Вт/(м \cdot К)$, теплоотдачи с поверхности шара α , $Вт/(м^2 \cdot К)$ вычисляются по формулам:

$$a = F_0 \cdot R^2 / \tau \quad \lambda = a \cdot c \cdot \rho \quad \alpha = \lambda \cdot Bi / R$$

5. Средняя по объему шара температура шамота t , $^{\circ}C$, за период опыта от $\tau = 0$ до τ

$$t = t_{ж} + 0,5(\Delta t_0 + 0,5(\Delta t_{ц} + \Delta t_{п})).$$

6. Справочное значение коэффициента теплопроводности шамота $\lambda_{спр}$, $Вт/(м \cdot К)$, при температуре t

$$\lambda_{спр} = 0,84 + 0,0006 \cdot t.$$

7. Погрешность измерения коэффициента теплопроводности шамота, %

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_{\text{спр}} - \lambda}{\lambda_{\text{спр}}} \cdot 100$$

8. Результаты расчетов заносятся в сводную табл. 6.

Таблица 6

Таблица расчетных данных

Опыт	t, °C	F ₀	В _i	Q, м ² /с	λ, Вт/м·К	α, Вт/м ² ·К	Δλ, %
1	2	3	4	5	6	7	8
1							
2							
3							

Контрольные вопросы

Вопросы к лабораторной работе

1. Что является целью работы?
2. Какие задачи необходимо решить в лабораторной работе?
3. Из каких элементов состоит экспериментальная установка?
4. В какой последовательности включаются элементы установки?
5. Какой метод используется для обработки опытных данных в работе?
6. Когда производится запись показаний приборов?
7. Зависят ли показания приборов от окружающей температуры?
8. Как проводится обработка экспериментальных данных?

Дополнительные вопросы при защите работы

1. Что такое коэффициент температуропроводности?
2. Что такое нестационарный тепловой процесс?
3. В чем заключается сущность использованного в данной работе метода определения коэффициента теплопроводности?
4. Как будут выглядеть кривые охлаждения $t = f(\tau)$ центра и поверхности шара в промежутке времени $0 < \tau < \infty$?
5. Перечислите условия однозначности (краевые условия) для решения задач теплопроводности?
6. Что такое коэффициент теплопроводности?
7. От чего зависит коэффициент теплопроводности?
8. Каковы единицы измерения коэффициента теплопроводности?
9. Какой метод измерения коэффициента теплопроводности используется в данной работе?
10. Как измеряются в опыте температуры поверхностей образца?
11. Почему недопустимо наличие воздуха в паровом пространстве стакана?

12. Какие процессы называются тепловыми?
13. Объясните явление теплопроводности?
14. Что является движущей силой тепловых процессов?

Лабораторная работа № 12

ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ЦИЛИНДРА В СВОБОДНОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА

Цель работы – ознакомиться с физическими принципами, лежащими в основе определения коэффициента теплоотдачи металлов при свободной конвекции.

Задание

1. Определить значение коэффициента теплоотдачи α при нескольких значениях температурного напора Δt и построить зависимость $\alpha = f(\Delta t)$.
2. Представить результаты опытов в обобщенном критериальном виде.
3. Сопоставить полученные данные с существующими в литературе зависимостями.

Описания экспериментальной установки

На [рис. 6](#) изображена схема экспериментальной установки для изучения конвективного теплообмена цилиндра в свободном потоке воздуха и определения коэффициента теплоотдачи.

Объектом исследования является труба **1**, внутри которой помещен электрический нагреватель. Он выполнен следующим образом, на фарфоровую трубку **2** равномерно навита нихромовая лента **3**, которая электрически изолирована от внутренней поверхности трубы.

Температура внешней поверхности трубы измеряется термопарами, горячие спаи **4** которых равномерно размещены по длине трубы. Холодные спаи **5** термопар находятся при температуре окружающего воздуха. ТермоЭДС, соответствующая температурному напору $(t_c - t_{ж})$, измеряется комбинированным прибором **6**, к которому термопары подключены через переключатель **7**. Мощность электронагревателя регулируется автотрансформатором **8** и определяется по показаниям вольтметра **9** и амперметра **10**.

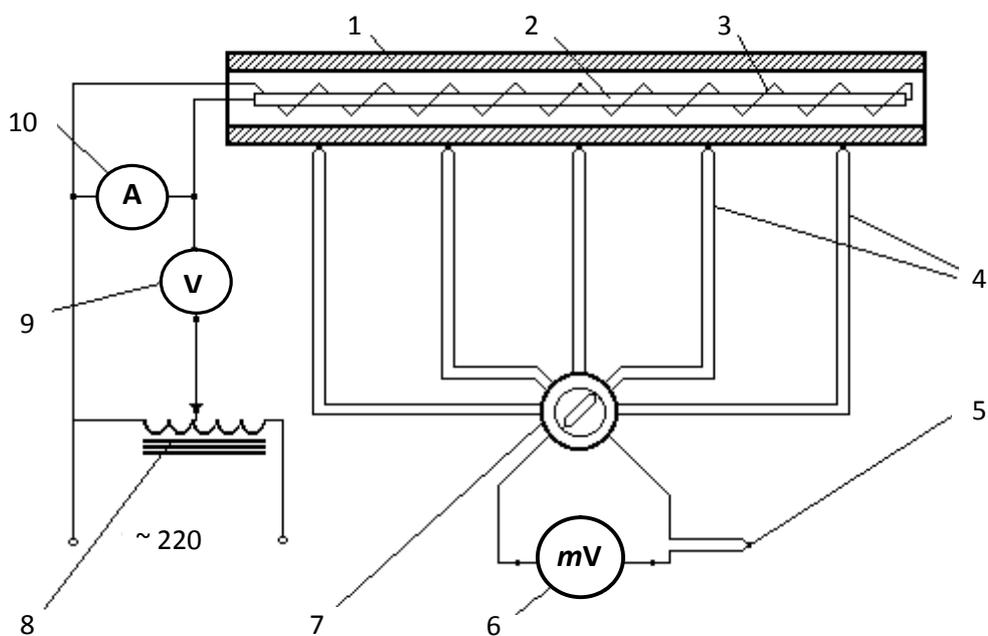


Рис. 6. Экспериментальная установка для изучения теплоотдачи:

1 – труба; 2 – фарфоровая трубка; 3 – нихромовая нить; 4 – горячие спаи термопар; 5 – холодные спаи термопар; 6 – комбинированный прибор; 7 – переключатель; 8 – автотрансформатор; 9 – вольтметр; 10 – амперметр.

Таблица 7

Таблица справочных данных

Опыт	Положение цилиндра	Длина, l , мм	Диаметр, d , мм	Степень черноты, ε	Мощность, Вт
1	2	3	4	5	6
1	с переменным углом наклона	920	25	0,06	70
2	горизонтальное	1632	32	0,072	120
3	вертикальное	1500	35	0,058	300

В учебных лабораториях кафедры установлено несколько экспериментальных установок для изучения свободной конвекции. Они отличаются друг от друга размерами цилиндров, расположением их в пространстве – горизонтальным, вертикальным. Кроме того, некоторые установки оснащены поворотным устройством, позволяющим менять угол наклона оси цилиндра к горизонтали от 0° до 90° . Сведения о размерах цилиндров, степени черноты и рекомендуемые режимы работы приведены в таблице 7.

Порядок выполнения работы

Включают электронагреватель тумблером "220 В" и питание цифровых приборов (вольтметра и амперметра) – тумблером "26 В". Авто-трансформатором устанавливают максимальную мощность в соответствии с условиями эксперимента и поддерживают её постоянной. Во время опыта измеряют мощность нагревателя с помощью вольтметра и амперметра, температура воздуха в помещении на расстоянии не менее 1 м от цилиндра. ТермоЭДС термопар на поверхности цилиндра измеряют с помощью комбинированного прибора работающего в режиме милливольтметра. Измерения в каждом опыте (при неизменной мощности нагревателя) повторяют несколько раз через 5 мин., добиваясь тем самым, чтобы 3 последних из них дали близкие или одинаковые результаты. Постоянство во времени измеряемых величин означает наступление стационарного режима теплообмена – это обязательное условие эксперимента. Аналогичным образом проводят три опыта, отличающихся мощностью электронагревателя.

Контролируемые во время опыта величины записывают в таблицу наблюдений.

Таблица 8

Таблица наблюдений

N опыта	N замер а	Мощность нагревателя, Вт	Темпер. воздуха, °С	ТермоЭДС термопар, мВ					Средняя температура поверхности цилиндра, °С
				1	2	3	4	5	
1.	1.								
	2.								
	3.								
	Ср								
...

Обработка экспериментальных данных

При обработке опытных данных для 1-го, 2-го и 3-го опыта определяются следующие величины:

1. По значениям термоЭДС, полученным в каждом замере, вычисляем усредненное по поверхности значение термоЭДС для каждой серии опытов:

$$E_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^n E_i / n .$$

2. Так как холодный спай термопар находится при температуре окружающего воздуха, то величина термоЭДС пропорциональна температурному напору $^{\circ}t$. Коэффициент пропорциональности для медь-константановой термопары $K = 15$, поэтому:

$$\Delta t = t_c - t_{ж} = 15 \cdot E_{ср}.$$

3. Средняя температура поверхности цилиндра:

$$t_c = t_{ж} + \Delta t;$$

4. Лучистый тепловой поток рассчитывается по уравнению Стефана-Больцмана, Вт:

$$Q = \varepsilon_{п} C_o \left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ж}}{100} \right)^4 \right] F$$

где ε – степень черноты берется из таблицы 7, в соответствии с типом излучаемого цилиндра;

C_o – коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела, равным $C_o = 5.67 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}^4)$.

5. Количество теплоты, отдаваемое боковой поверхностью цилиндра, равна мощности нагревателя, Вт:

$$Q = U \cdot I;$$

6. Коэффициент теплоотдачи определяется по формуле, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$:

$$\alpha = \frac{Q - Q_{л}}{F(t_c - t_{ж})}$$

7. График зависимости $\alpha = f(t)$.

8. По результатам опытов вычисляются значения критериев подобия:

- критерий Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$$

- критерий Грасгофа

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot l^3}{\nu^2}$$

где β – коэффициент объемного расширения $\beta = 1/T_{ж}$ 1/К.

- критерий Прандтля

$$Pr = \nu/a$$

9. Справочные значения Nu рассчитываются по уравнению

$$Nu_{\text{спр}} = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n$$

необходимые для расчетов значения величин C и n выбираем в соответствии с ориентацией цилиндра в пространстве ($C = 0,5$ и $n = 0,25$ – для горизонтальных труб, $C = 0,75$ и $n = 0,25$ – для вертикальных труб).

10. Графики зависимостей $\ln Nu_{\text{оп}} = f[\ln(Gr \cdot Pr)]$ и $\ln Nu_{\text{спр}} = f[\ln(Gr \cdot Pr)]$:

11. Относительная погрешность опыта равна:

$$\Delta = \frac{Nu_{\text{оп}} \cdot Nu_{\text{спр}}}{Nu_{\text{спр}}}$$

Контрольные вопросы

Вопросы к лабораторной работе

1. Что является целью работы?
2. Какие задачи необходимо решить в лабораторной работе?
3. Из каких элементов состоит экспериментальная установка?
4. В какой последовательности включаются элементы установки?
5. Какой метод используется для обработки опытных данных в работе?
6. Когда производится запись показаний приборов?
7. Зависят ли показания приборов от окружающей температуры?
8. Как проводится обработка экспериментальных данных?

Дополнительные вопросы при защите работы

1. Что такое конвекция?
2. Что такое теплоотдача?
3. Напишите основное уравнение теплоотдачи или закона охлаждения Ньютона?
4. Дайте формулировку коэффициента теплоотдачи?
5. Назовите основные критерии теплового подобия?
6. Напишите основное критериальное уравнение теплоотдачи?
7. Напишите основное уравнение теплопередачи.
8. Что показывает коэффициент теплопередачи?
9. Какое уравнение называют уравнением аддитивности термических сопротивлений?

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Коэффициенты пересчета K от одних единиц давления к другим

А	В						
	Н/м ²	бар	ат = кгс/см ²	физ.ат. атм	мм рт.ст.	мм вод.ст.	кг/м ²
Н/м ² (Па)	1	10 ⁻⁵	1,019·10 ⁻⁵	0,9869·10 ⁻⁵	750,06·10 ⁻⁵	0,10197	0,102
бар	10 ⁵	1	1,01972	0,98692	750,06	1,01972 · 10 ⁻⁴	1,02·10 ⁴
ат = кгс/см ²	0,981·10 ⁵	0,98067	1	0,96784	735,56	10 ⁻⁴	10 ⁴
физ.ат. атм	1,013·10 ⁵	1,01325	1,0332	1	760	1,0332 · 10 ⁻⁴	1,033·10 ⁴
мм рт.ст.	133,322	1,3332 · 10 ⁻³	1,3758 · 10 ⁻³	1,3158 · 10 ⁻³	1	13,5951	13,6
мм вод.ст.	9,80665	9,80665	10 ⁻⁴	9,679 · 10 ⁻⁵	7,3556 · 10 ⁻⁴	1	10 ³
кг/м ²	9,81	0,981·10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	0,968·10 ⁻⁴	0,736·10 ⁻¹	10 ⁻³	1

Таблица 2

Зависимость между давлением p_s и температурой t_s для
насыщенного водяного пара

p_s , ата	t_s , °C	p_s , ата	t_s , °C	p_s , ата	t_s , °C	p_s , ммрт.ст.	t_s , °C	p_s , ата	t_s , °C	p_s , ата	t_s , °C
0,035	26,4	0,12	49,1	0,27	66,3	725	98,8	1,0	99,1	2,5	126,8
0,040	28,6	0,13	50,7	0,28	67,1	730	98,9	1,1	101,8	2,6	128,1
0,045	30,7	0,14	52,2	0,29	67,9	735	99,1	1,2	104,2	2,7	129,3
0,050	32,6	0,15	53,6	0,30	68,7	740	99,2	1,3	106,6	2,8	130,5
0,055	34,2	0,16	54,9	0,32	70,2	745	99,4	1,4	108,7	2,9	131,7
0,060	35,8	0,17	56,2	0,34	71,6	750	99,6	1,5	110,8	3,0	132,9
0,065	37,3	0,18	57,4	0,36	72,9	755	99,8	1,6	112,7	3,1	134,0
0,070	38,7	0,19	58,6	0,38	74,2	760	100,0	1,7	114,6	3,2	135,1
0,075	40,0	0,20	59,7	0,40	75,4	765	100,2	1,8	116,3	3,3	136,1
0,080	41,2	0,21	60,7	0,45	78,3	770	100,4	1,9	118,0	3,4	137,2
0,085	42,3	0,22	61,7	0,50	80,9	775	100,5	2,0	119,6	3,5	138,2
0,090	43,4	0,23	62,7	0,55	83,2	780	100,7	2,1	121,2	3,6	139,2
0,095	44,5	0,24	63,6	0,60	85,5	785	100,9	2,2	122,6	3,7	140,2
0,10	45,5	0,25	64,6	0,65	87,5	790	101,1	2,3	124,1	3,8	141,1
0,11	47,3	0,26	65,4	0,70	89,4	800	101,4	2,4	125,5	3,9	142,0

Таблица 3

Физические свойства жидкостей

Жидкость	ρ , кг/м ³	$\beta_P \cdot 10^3$, МПа ⁻¹	$\beta_T \cdot 10^3$, °C ⁻¹	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$\sigma \cdot 10^3$, Н/м
Вода пресная	998	0,49	0,15	1,01	73
Спирт этиловый	790	0,78	1,10	1,52	23
Масло Автол М-8В	900	0,60	0,64	300	25
Масло Индустриальное 20	900	0,72	0,73	110	25
Масло Трансформаторное	890	0,60	0,70	30	25
Масло АМГ-10	850	0,76	0,83	20	25

Таблица 4

Характеристики насадок используемых в лабораторных установках

Жидкость	Коэффициент			
	ξ	ε	φ	μ
(Круглое отверстие)	0,06	0,64	0,97	0,62
Внешний цилиндрический	0,5	1,00	0,82	0,82
Внутренний цилиндрический	1,00	1,00	0,71	0,71
Конический расходящийся при $\alpha = 5 - 7^\circ$	0,4	1,0	0,50	0,50
Конический расходящийся при $\alpha = 13^\circ 24'$	0,09	0,98	0,96	0,94
Конусоидальный	0,04	1,0	0,98	0,98

Таблица 5

Физические свойства воздуха при 760 мм рт.ст.

t , °C	ρ , кг/м ³	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
0	1,293	2,44	13,28	0,707
10	1,247	2,51	14,16	0,705
20	1,205	2,59	15,06	0,703
30	1,165	2,67	16,00	0,701
40	1,128	2,76	16,96	0,699
50	1,093	2,86	17,95	0,698
60	1,060	2,90	18,97	0,696
70	1,029	2,97	20,02	0,694
80	1,000	3,05	21,09	0,692
90	0,972	3,13	22,10	0,690
100	0,946	3,21	23,13	0,688

Таблица 6

Зависимость между давлением и температурой насыщенного водяного пара

p , ата	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
t , °C	99,1	101,8	104,2	106,6	108,7	110,8	112,7
p , мм рт.ст.	750	760	770	780	790	800	810
t , °C	99,6	100	100,4	100,7	101,1	101,4	101,8

Физические свойства воды на линии насыщения

t , °С	ρ , кг/м ³	c , кДж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	
0	999,8	4,217	0,552	1,792	13,67
10	999,7	4,191	0,578	1,307	9,47
20	998,2	4,181	0,598	1,004	7,01
30	995,7	4,178	0,614	0,801	5,43
40	992,2	4,178	0,628	0,658	4,35
50	988,0	4,180	0,641	0,554	3,57
60	983,2	4,180	0,651	0,475	3,00
70	977,8	4,189	0,661	0,413	2,56
80	970,8	4,196	0,369	0,365	2,23
90	965,3	4,204	0,676	0,326	1,96
100	958,4	4,215	0,682	0,295	1,75

ЛИТЕРАТУРА

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. – 10-е изд., стер., дораб. Перепеч. с изд. 1973 г. – М.: ООО ТИД «Альянс». 2008 г. 753 с.
2. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. Часть 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты / Ю.И. Дытнерский. – М.: Химия, 2002. – 400 с.
3. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. Часть 2. Массообменные процессы и аппараты. / Ю.И. Дытнерский. – М.: Химия, 2002. – 368 с.
4. Основные процессы и аппараты химической технологии. Пособие по проектированию / Ю.И. Дытнерский [и др.]; 4-е изд. – М.: ООО ТИД «Альянс», 2008. – 496 с.
5. Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. – М.: ООО ТИД «Альянс», 2013. – 576 с.
6. Плановский, А.Н. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии / А.Н. Плановский, П.И. Николаев. – М.: Химия, 1987. – 496 с.
7. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. Книга 1 / В.Г. Айнштейн [и др.]. – М.: Логос, 2002. – 912 с.
8. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. Книга 2 / В.Г. Айнштейн [и др.]. – М.: Логос, 2002. – 872 с.
9. Тимонин А.С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования. Справочник. Т. 1. – Калуга: Изд. Н. Бочкаревой, 2002. – 850 с.
10. Тимонин А.С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования. Справочник. Т. 2. – Калуга: Изд. Н. Бочкаревой, 2002. – 1025 с.
11. Тимонин А.С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования. Справочник. Т. 3. – Калуга: Изд. Н. Бочкаревой, 2002. – 968 с.
12. Кафаров В.В. Основы массопередачи. Системы газ-жидкость, пар- жидкость, жидкость-жидкость / В.В. Кафаров. – М.: Высшая школа, 1979. – 439 с.