

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение.....	4
РАЗДЕЛ 1. Порядок проведения лабораторных работ.....	5
1. Основные требования.....	5
2. Правила работы студентов в учебной лаборатории кафедры.....	5
РАЗДЕЛ 2. Описания лабораторных работ.....	8
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. Измерение температуры.....	8
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. Исследование термодинамических параметров при фазовых переходах на линии насыщения жидкость пар.....	15
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. Исследование процесса адиабатического дросселирования реальных газов.....	24
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. Исследование удельной теплоемкости твердых тел.....	32
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. Исследование теплоемкости Жидкостей и газов в проточном калориметре.....	39
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6. Исследования вихревого преобразователя энергии потока газа.....	43
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7. Исследование термоэлектрического преобразователя (ТЭП) в режиме теплового насоса.....	51
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8. Исследование термоэлектрического преобразователя в отопительном цикле.....	58
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9. Исследование работы ТЭП в режиме электрического генератора.....	63
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	66

## Введение

Особенность курса термодинамики в НИУ ИТМО состоит прежде всего в том, что он следует непосредственно за курсом общей физики, в котором термодинамика представлена весьма кратким по объему разделом, и является вводным для студентов III курса перед изучением в дальнейшей таких, основных для бакалавров по направлениям 16.03.01- «Техническая физика» и 14.03.01 - «Ядерная энергетика и теплофизика», дисциплин, как "Гидрогазодинамика", "Теплофизические свойства веществ", "Теория тепло- и массообмена".

С другой стороны, выпускники НИУ ИТМО в основном работают в отрасли оптического и радиоэлектронного приборостроения, стремящейся к миниатюризации и отличающейся сложными энергетическими воздействиями на элементы приборов. С точки зрения термодинамики, это означает, что основное в курсе - исследование термодинамических процессов и специфических термодинамических циклов.

Вышеперечисленные особенности курса предьявляют, по нашему мнению, требования к построению лабораторного практикума.

Лабораторный практикум начинается с первого раздела, в котором изложены основные правила работы студентов в учебной лаборатории кафедры теплофизики.

Во втором разделе приведены описания лабораторных работ курса. Приложения к практикуму содержат необходимые справочные данные по термодинамическим свойствам веществ, используемых при проведении расчетов и обработке результатов экспериментов.

Вводная часть к каждой работе помогает наряду с лекционным материалом усвоить теоретические и экспериментальные данные по вопросам предстоящей работы. Далее излагаются цели и задачи работы, описания установок, порядок проведения и требования к обработке результатов измерений.

## РАЗДЕЛ I. Порядок проведения лабораторных работ

### I. Основные требования

Перед приходом на лабораторное занятие студент должен изучить первый раздел практикума и вводную часть к очередной лабораторной работе, дополнив эти краткие сведения материалом соответствующей лекции или чтением раздела рекомендованной книги.

Перед выполнением лабораторной работы студент обязан ознакомиться с ее основными теоретическими положениями и составить краткий конспект, содержащий цель работы и необходимые расчетные соотношения; схему лабораторной установки; таблицы для записи результатов измерений и расчетов.

Контроль подготовки студента к работе проводится перед ее началом с применением тестов или устным опросом.

Приступить к выполнению лабораторной работы студент может только при наличии краткого конспекта по этой работе, положительной оценки при опросе и оформленного отчета по предыдущей работе.

Отчет о работе должен содержать принципиальную схему опыта; все относящиеся к данному исследованию формулы и зависимости; результаты наблюдений и последующих вычислений, сведенные в пронумерованные таблицы; итоговые графики опыта и расчета с указанием размерности соответствующих величин; основные выводы, сделанные студентом в результате проведения опыта, и сопоставление его результатов с теоретическими расчетами.

Защита выполненных работ проводится индивидуально при наличии соответствующим образом оформленного отчета.

Для выполнения лабораторной работы и ее успешной защиты студенту необходимо знать основные понятия метрологии.

Студент должен классифицировать свои измерения в лабораторной работе, четко различать основные виды погрешностей измерений, быть готовым к анализу источников систематических погрешностей. Пользуясь паспортными и справочными данными, по указанию преподавателя студент должен дать полную характеристику используемых им в работе измерительных средств. Точность обработки результатов измерений должна быть согласована с точностью самих измерений.

Необходимые сведения о методах оценки погрешности измерений можно получить из работ [1 – 4].

### 2. Правила работы студентов в учебной лаборатории кафедры

- к работе в учебной лаборатории допускаются студенты, прошедшие инструктаж по ТБ с соответствующей отметкой в журнале.

- ответственным за выполнение нижеследующих правил и соблюдение порядка в лаборатории является преподаватель.

- перед началом работы студент обязан ознакомиться с описанием установки и порядком проведения работы. Включать установку разрешается только в присутствии ответственного лица.

- при уходе с рабочего места не разрешается оставлять под напряжением лабораторные схемы и установки.

- после окончания лабораторной работы студент обязан выключить электропитание, закрыть воду, привести в порядок рабочее место.

Запрещается:

- приступать к работе в лабораториях кафедры без получения инструктажа;

- включать установку, не ознакомившись с описанием и инструкцией пользования прибором или установкой;

- проводить работу при наличии портфелей или сумок на лабораторных столах;

- включать любые другие приборы, не относящиеся к выполняемой студентом лабораторной работе.

Студенты, нарушившие установленные правила, отстраняются от выполнения работы и допускаются к выполнению последующих лабораторных работ только с разрешения преподавателя ответственного за лабораторную базу кафедры.

Для помощи студентам по соблюдению правил техники безопасности приведем некоторые выписки из них, наиболее характерные для работ, выполняемых, на лабораторных установках курса «Термодинамика».

## 2.1. Правила работы на установках, питаемых электрическим током.

Запрещается:

- включать и выключать силовые и осветительные рубильники без разрешения преподавателя или лаборанта;

- производить исправления в электросхемах, находящихся под напряжением;

- оставлять систему, находящуюся под напряжением, без присмотра;

- снимать и перевешивать предупреждающие и запрещающие плакаты;

- выключать блокировочные устройства;

- заходить и протягивать руки за ограждения во время работы установки;

- снимать заземляющие провода и работать с незаземленным электрооборудованием;

- касаться неизолированных проводников, металлических клемм, обмоток реостатов и других деталей электросхем, находящихся под напряжением.

В случае возникновения пожара немедленно вызвать пожарную команду по пожарному сигналу или телефону 01 и приступить к его тушению своими силами. При этом необходимо:

- а) немедленно остановить установку и полностью выключить электрическое питание;
- б) электропроводку тушить только углекислотными огнетушителями.

2.2. Правила работы на установках, находящихся под избыточным давлением.

- При работе на установке, находящейся под избыточным давлением, необходимо следить за показаниями манометра, ни в коем случае не допускать превышения давления, указанного для данной работы в учебном пособии. В случае, если давление превысит допустимый предел, немедленно сообщать об этом преподавателю или лаборанту.

- При измерениях количества конденсата, а также при контроле уровня воды в кипятильниках следует остерегаться поломки водомерных стекол, так как при этом возможны ожоги горячей водой и паром.

2.3. Правила пользования ртутными приборами

- При выполнении различных работ, связанных с применением ртутных приборов (термометров, барометров и др.) следует помнить, что ртуть ядовита, и необходимо соблюдать особые меры предосторожности, чтобы избежать разлива ртути; при пользовании всеми стеклянными ртутными приборами особое внимание следует уделять исключению возможности поломки стеклянной трубки, содержащей ртуть.

#### Литература к разделу

1. Димов Ю.В. Метрология, стандартизация и сертификация: Учебник для вузов. СПб.: Питер, 2010.-464 с.
2. Сергеев А.Г., Крохин В.В. Метрология. –М.: Логос, 2000.- 408 с.
3. Бегункова А.Ф. Парфенов В.Г. Обработка результатов наблюдений при выполнении лабораторных работ физического практикума /Уч. пособ. – Лен. ин-т точн. механики и оптики, 1980.
4. Статистические методы обработки результатов теплофизического эксперимента. Учебное пособие. – Л., 1981.

## РАЗДЕЛ 2. Описания лабораторных работ

### Лабораторная работа № I

## ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель работы - показать теоретические положения, на основании которых проводятся измерения температур в технике и экспериментальных исследованиях, провести измерения температуры жидкости различными способами.

Температура тела связана с кинетической энергией молекул, поэтому она может быть измерена не непосредственно, а лишь как некоторая функция других параметров, поддающихся прямому измерению.

Хотя многие физические величины зависят от температуры, далеко не все из них могут быть использованы для ее измерения. Выбор параметра, по измерению которого можно судить о температуре, производится с учетом следующих требований. Выбранный параметр должен:

- изменяться с изменением температуры непрерывно, монотонно и однозначно;
- не зависеть от других параметров;
- быть точно воспроизводимым и измеряемым простым и надежным способом.

Такой параметр называется термометрическим. Все реальные термометрические параметры как-то отклоняются от тех требований, которые были перечислены выше. С небольшими допущениями в качестве термометрических в измерительной практике используются следующие параметры: давление или объем газов, объем жидкостей, электрическое сопротивление проводников и полупроводников, термоЭДС некоторых пар и т.д.

Выбор того или иного параметра определяет способ измерения температуры. В зависимости от условий опыта (интервал измеряемых температур, свойства среды, требования к точности и др.) применяются следующие основные приборы для измерения температуры [ 1 ].

**1. Жидкостные термометры**, основанные на зависимости объема жидкости от ее температуры. Применяются в интервале температур от  $-200$  до  $+1200$  °С, имеют простое устройство и не требуют вспомогательной аппаратуры. В качестве жидкостей используют ртуть, спирт, пентан и т.д.

**2. Термопарные термометры.** Термопара представляет собой комбинацию спаев неоднородных материалов, в которой возникающая термоЭДС пропорциональна разности температур спаев (эффект Зеебека). Простейшая схема соединения термоэлементов для измерения разности температур показана на рис.1.

Здесь А и Б — разнородные материалы; 1 и 2 - термопары. Если температуру одного из спаев поддерживать постоянной (например, температура

спая 1  $t \sim \text{const}$ ), то величина термоЭДС будет зависеть только от температуры второго спая. Он используется в качестве рабочего при определении измеряемой температуры  $t_2$  по термоЭДС термопары.

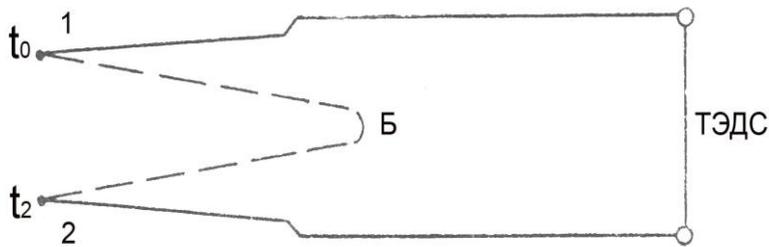


Рис. 1 Схема термопары

ТермоЭДС термопары невелика (0,01-0,06 мВ на один градус), поэтому ее измеряют или высокочувствительными милливольтметрами или потенциометрами, обеспечивающими достаточную точность для практических целей.

К достоинствам термопары относятся: простота изготовления, небольшие размеры спая, малая теплоемкость термочувствительного элемента-спая, малое время установления теплового равновесия между спаем и средой.

Недостаток термопары - небольшая величина термоЭДС при низких температурах и в связи с этим трудность точного измерения ее. С понижением температуры термоЭДС в спаяе уменьшается и обращается в нуль при температуре, равной абсолютному нулю.

Поэтому чувствительность термометра с понижением температуры быстро падает. Так, например, наиболее часто применяемая при низкотемпературных измерениях термопара медь-константан имеет при температуре 293К чувствительность около 40 мкВ/К, при 90К ее чувствительность равна 17 мкВ/К, а при 20К - всего 5 мкВ/К.

К материалам, предназначенным для изготовления термопар, предъявляется ряд требований:

1. Они должны в пределах измеряемых температур не изменять своих физических свойств, не окисляться и не поддаваться иным вредным воздействиям.

2. Температурный коэффициент электрического сопротивления должен быть минимальным, а электропроводность - высокой.

3. Величина термоЭДС выбираемых материалов должна быть достаточной для точных измерений и изменяться однозначно в зависимости от температуры.

4. Термоэлектродные материалы должны производиться с неизменными свойствами в больших количествах.

Наиболее распространенные термопары, применяемые для измерения температуры ниже 275 К, приведены в таблице.

№ п/п	Наименование термопары	ТермоЭДС, мВ при $t_0 = 273 \text{ К}$ $t_2 = 373 \text{ К}$
1.	Медь-константан (60% Cu +40% Ni )	4,26
2.	Медь-копель (56%Cu +44% Ni)	4,75
3.	Хромель- копель (90%Ni+10% Cr )	6,95
4.	Железо-копель	5,75
5.	Хромель-алюмель(95%Ni+5% Al,Mg,Si)	4,1

**3. Термометры сопротивления** применяются в зоне от температуры кипения жидкого гелия до 1000÷1100°С, обеспечивают высокую точность и надежность измерения.

Действие термометра сопротивления основано на свойстве металлов и сплавов изменять электрическое сопротивление с изменением температуры по определенному закону.

При приближенных измерениях (погрешность более 0,01°С) эта зависимость принимается линейной, при более точных измерениях используются нелинейные зависимости.

Термометр сопротивления представляет собой медную или платиновую проволоку толщиной 0,05÷0,2мм, навитую на изолирующий каркас и помещенную в металлический чехол. Проволока имеет четыре вывода: два - для пропускания по ней измерительного тока; два - для измерения падения напряжения на термометре сопротивления.

**4. Оптические, радиационные и цветовые пирометры** служат для измерения температур выше 500÷600°С.

В настоящей работе использованы три первых способа определения температуры: при помощи жидкостного ртутного термометра, термометра сопротивления и термопары.

При градуировке всех применяемых в практике термометров берется за основу термодинамическая шкала температур. Это объясняется следующими причинами.

Термометрические параметры зависят от температуры по-разному для различных веществ. Поэтому численные значения температуры, измеренные ртутными, спиртовым или платиновыми термометрами, не будут одинаковыми, т.е. при измерении одной и той же температуры будет получено столько значений, сколько веществ мы использовали в качестве термометрических. Следовательно, все температурные шкалы, построенные на основе таких измерений, условны. Для однозначного определения температуры необходимо выбрать такой параметр, который не зависел бы от природы вещества. Таким

параметром является КПД тепловой машины Карно. Температурная шкала, построенная на основе функциональной зависимости КПД от температуры, называется термодинамической или абсолютной.

Физический смысл абсолютной шкалы заключается в том, что наименьшая температура по этой шкале соответствует той температуре охладителя в цикле Карно, при которой КПД его равен 0. Из этого следует, что в абсолютной шкале нет и не может быть отрицательных температур, так как согласно второму началу термодинамики КПД тепловой машины не может быть  $> 0$ .

Итак, основными точками термодинамической шкалы являются наименьшая возможная температура - абсолютный ноль и тройная точка воды (273,16 К), где К - единица измерения температуры по термодинамической шкале, принятая в системе СИ. Применяемая также стоградусная шкала имеет такую же единицу измерения, но другое начало отсчета - точка таяния льда (273,15 К); градус стоградусной шкалы обозначается  $^{\circ}\text{C}$ .

### Описание экспериментальной установки

Установка состоит из термостата и измерительной схемы. Термостат создает теплоизолированную систему, в которую помещены чувствительные элементы термометра сопротивления и термопары, а также контрольного и контактного термометров. В термостате существует насосная система, которая предназначена для циркуляции термостатной жидкости через какой-либо прибор вне или внутри термостата (при необходимости поддерживать в этом объеме постоянство температуры).

Контактный термометр используется для регулирования уровня температуры термостатной жидкости.

Схема установки для исследования работы термопары и термометра сопротивления приведена на рис. 2.

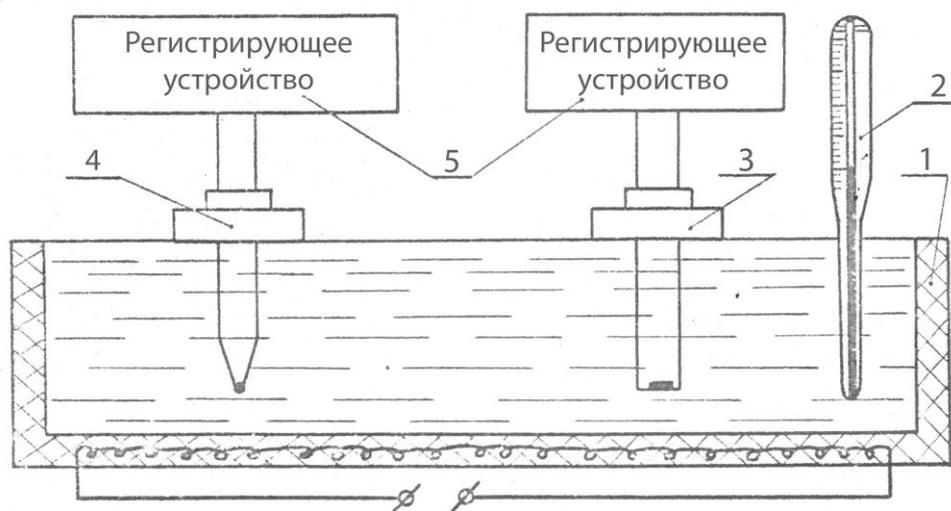


Рис. 2 Схема экспериментальной установки

В результате измерений определяются ЭДС термопары и сопротивление термометра сопротивления, по величине которых с помощью градуировочных таблиц находят искомую температуру.

На рис. 2 следующие обозначения:

1 - термостат; 2 - ртутный термометр; 3 - термометр сопротивления; 4 - термопара; 5 - регистрирующее устройство.

В случае измерения температуры термопарой в качестве регистрирующего устройства могут быть использованы потенциометр ПП-63, гальванометр, цифровой вольтметр; в случае термометра сопротивления - потенциометр ПП-63, омметр.

Потенциометрический метод точного измерения температур основан на уравнивании (компенсации) термоЭДС, возникающей в цепи термопары, точно измеряемым падением напряжения в цепи источника тока потенциометра. В практике измерения температур получили широкое распространение лабораторные потенциометры.

#### Задание по работе:

1. Ознакомиться с принципом работы термопарных термометров, термометров сопротивления, принципиальной схемой лабораторной установки и ответить на вопросы преподавателя для допуска к работе.
2. Провести измерение температуры жидкости в диапазонах, заданных преподавателем.
3. Провести обработку экспериментальных результатов, оценить погрешность эксперимента, заполнить таблицу и подготовить отчет [2].

В отчет о работе должны входить следующие данные:

1. Краткое описание экспериментальной установки.
2. Заполненный протокол наблюдений (таблица измеренных значений температур). Расчет абсолютных и относительных погрешностей измерения термометром сопротивления и термопарами.
3. График градуировки термометра сопротивления.

#### Порядок выполнения лабораторной работы:

К началу работы с помощью контактного термометра установить определенную температуру воды в термостате.

В ходе работы необходимо:

1. Измерить температуру воды ртутным термометром. Попытаться при этом определить температуру с точностью до половины деления шкалы термометра.
2. Измерить температуру воды с помощью термопар. Для этого, убедившись, что холодный спай находится в сосуде Дьюара с тающим льдом, произвести измерение ЭДС в цепи термопары милливольтметром. Для определения температуры по значению ЭДС используют данные о градуировке термопары в виде графика или таблицы.

3. Измерить температуру воды с помощью термометра сопротивления. Для этого подключить провода термометра сопротивления к входным клеммам цифрового омметра и произвести запись показаний для соответствующих температур.

### Протокол наблюдения

Тепловой режим	ЭДС термопар, мВ	R, Ом	t, °C	T, К
Комн. температура				
Среднее				
40°C				
Среднее				
60°C				
Среднее				
80°C				
100°C				

### Обработка результатов измерений

По данным градуировочных графиков определяется температура среды в каждом режиме и заносится в сводную таблицу I.

Таблица I

Тепловой режим	Термопара	Термометр сопротивления	Ртутный термометр
Комн. температура			
40°C			
60°C			
80°C			
100°C			

Погрешности измерения температуры термопарой и термометром сопротивления определяются точностью приборов, входящих в измерительную схему.

Для ртутного термометра абсолютная погрешность составляет половину цены деления  $\Delta t$  относительная -  $\Delta t/t$  [ 2 ].

Для термометра сопротивления погрешность измерения температуры определяется погрешностью измерения сопротивления  $\Delta \pm R$  и  $\Delta R/R$ , где

$\Delta R = \pm 2$  единицы последнего разряда шкалы прибора.

В случае измерения термопарой погрешности измерений вычисляются аналогично.

#### Контрольные вопросы:

1. Зависят ли коэффициенты преобразования термометра сопротивления от температуры?
2. Как устроена дифференциальная термопара?
3. Одинаков ли предел допускаемой относительной погрешности измерения во всех точках шкалы автоматического потенциометра?
4. Можно ли ртутным стеклянным термометром измерить температуру выше температуры кипения ртути ( $356,6^{\circ}\text{C}$ )?
5. Совпадают ли значения коэффициентов объемного теплового расширения и видимого объемного теплового расширения термометрического вещества?
6. Какими метрологическими характеристиками различаются термометра сопротивления различных классов, но изготовленные из одного материала?

#### Литература

1. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы. –М.: «Энергия», 1978.-704 с.
2. Димов Ю.В. Метрология, стандартизация и сертификация: Учебник для вузов. СПб.: Питер, 2010.-464 с.

## Лабораторная работа № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ НА ЛИНИИ НАСЫЩЕНИЯ ЖИДКОСТЬ – ПАР

Цель работы - экспериментальное и теоретическое изучение зависимости давления от температуры  $p(T)$  на линии фазового перехода на одной из двух экспериментальных установок и расчет некоторых термодинамических характеристик исследуемого вещества.

Знание зависимости  $p(T)$  необходимо для использования этих данных при расчетах процессов тепломассообмена при фазовых переходах в большом многообразии технических устройств (парогенераторов, сушильных установок, теплообменников, холодильных систем) и природных явлений (метеорологии и др.); углубления теоретических знаний о природе исследуемого вещества.

Основы теории. Состоянием насыщения принято называть такое термодинамическое состояние, в котором внутри вещества могут равновесно сосуществовать несколько фаз. Простейшими примерами таких состояний являются однокомпонентные, химически однородные вещества с двумя одновременно сосуществующими агрегатными фазами, например чистые вещества с жидкой и паровой фазами.

Опыт показывает, что вещество в состоянии насыщения обладает целым рядом аномальных свойств, причем многие из них находят сейчас широкое практическое применение.

Например, многие вещества при фазовом переходе жидкость-пар (в испарителе) и пар-жидкость (в конденсаторе) способны переносить молекулярными потоками значительные количества тепловой энергии со скоростью сотен метров в секунду при весьма малых (градусы или доли градусов) перепадах температуры. Такие устройства, называемые обобщенно "тепловыми трубами", представляют собой своего рода "тепловые сверхпроводники". Благодаря уникальным термодинамическим свойствам влажный водяной пар до сих пор остается главным рабочим веществом современных турбогенераторов.

Состояние насыщения представляется интересным не только из-за своей практической, чисто утилитарной значимости. Исследование свойств в двухфазном состоянии позволяет проникнуть в структуру межмолекулярных связей и отыскать ряд важных микрофизических свойств веществ.

В соответствии с правилом фаз чистое, однокомпонентное вещество в состоянии насыщения обладает не двумя, как обычно, а одной энергетической степенью свободы. Следовательно, из двух термических параметров состояния в этом случае независимо можно изменять только один: либо только температуру  $T$ , либо только давление  $P$ . Если в качестве независимого параметра будет выбрана температура  $T$ , то каждому ее значению в состоянии равновесия двух фаз будет соответствовать свое конкретное значение давления  $p$  (рис. 1).

Совокупность равновесных состояний двухфазной системы на диаграмме Р-Т образует линию насыщения Р(Т). Если в качестве фаз выступают три основные

агрегатные состояния: твердое, жидкое и газообразное, то диаграмма всех возможных термических состояний такого вещества может быть представлена плоскостью Р, Т, разделенной на самостоятельные однофазные области тремя выходящими из общей (тройной) точки линиями равновесия, как показано на рис. 1, а в тройной точке 0 равновесно сосуществуют одновременно три фазы. Линия 1 соответствует состояниям равновесия "твердое тело - пар"; линия 2 - состоянию насыщения "жидкость-пар" и линия 3 - "твердое тело-жидкость". У нормальных веществ все три линии  $P_1(T)$ ,  $P_2(T)$ ,  $P_3(T)$  имеют положительный наклон в широкой области изменения параметров Р, Т. Однако встречаются вещества у которых линия равновесия "твердое тело-жидкость" аномальна, т.е. имеет отрицательный наклон. Типичным примером такого вещества является вода, жидкая фаза которой плотнее твердой (кроме того  $V_i$  и др.).

Переходы вещества из одного агрегатного состояния в другое относятся к наиболее распространенной группе фазовых переходов первого рода. Характерным признаком такого перехода является изменение скачком удельного объема  $V$  (плотности  $\rho = V^{-1}$ ) и удельной энтропии  $S$ . Вследствие скачка энтропии фазовый переход первого рода всегда сопровождается теплотой перехода  $r$ . Все без исключения характеристики вещества, подобно давлению Р, на линии перехода (насыщения) остаются однозначными функциями температуры Т.

В теплотехнике особо важное место занимают двухфазные системы "жидкость-пар". Линия равновесия "жидкость-пар" (см. рис. 1,а) имеет четко ограниченную длину. Ее началом служит тройная точка 0, а концом - критическое состояние К. За точкой К (при  $p > p_k$  и  $T > T_k$ ) качественное различие между жидким и газообразным состоянием исчезает, поэтому эту область состояний называют обобщенно сверхкритической.

Давление и температура вещества на линии насыщения "жидкость-пар" связаны между собой универсальным термодинамическим дифференциальным уравнением Клапейрона-Клаузиуса [1]:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{r}{T \cdot (V_{\Pi} - V_{Ж})} \quad (1)$$

где  $r(T)$  - удельная теплота парообразования жидкости, Дж·кг<sup>-1</sup>;  
 $V_{\Pi}$ ,  $V_{Ж}$  - удельные объемы пара и жидкости на линии насыщения, м<sup>3</sup>·кг<sup>-1</sup>

Уравнение (1), в принципе, справедливо для любого фазового перехода первого рода. Вывод его рассмотрен подробно в лекционной части курса.

В соответствии со вторым началом термодинамики теплота парообразования  $r$  связана со скачком энтропии в точке перехода соотношением

$$r = T \cdot (S_{\Pi} - S_{Ж}) \quad (2)$$

где  $S_{\Pi}$  и  $S_{Ж}$  - удельные энтропии пара и жидкости на линии насыщения в точке с температурой Т, Дж/(кг·К).

Линия насыщения  $P(T)$ , если ее представить в диаграммах  $p-V$  и  $T-S$ , трансформируется в область двухфазного состояния (рис.1,б и 1,в). Левые границы фазового перехода соответствуют на этих диаграммах насыщенной жидкости, а правые - сухому насыщенному пару.

Промежуточная область является двухфазной областью влажного пара .

Чем ниже температура равновесия  $T$ , тем сильнее различаются между собой по свойствам жидкость и сухой пар. Вблизи тройной точки  $p_0, T_0$  при низких давлениях уравнение (I) допускает существенные упрощения, так как удельный объем пара  $V_{II}(T)$  возрастает до значения  $V_{II} > V_{ж}$  и может рассчитываться по уравнению состояния идеального газа:

$$V_{II} \approx \frac{R}{\mu} \cdot \frac{T}{p} \quad (3)$$

Следовательно, в области низких давлений уравнение Клапейрона-Клаузиуса приобретает вид

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\mu}{R} \cdot \frac{p \cdot r}{T^2} \quad (4)$$

где  $R = 8314$  Дж/(кмоль·К) универсальная газовая постоянная;  $\mu$ - мольная масса вещества, кг·кмоль<sup>-1</sup> (у воды, например,  $\mu = 18$  кг·кмоль<sup>-1</sup>).

Опыт показывает, что по мере роста температуры перехода теплота парообразования у всех без исключения веществ падает и становится равной нулю в критической точке. Однако вдали от критической точки ее изменение обычно незначительно и в узком диапазоне рабочих температур им удастся пренебречь. Если принять условие  $r = \text{const}$ , уравнение (4) дополнительно упрощается и допускает непосредственное интегрирование. В результате приходим к достаточно простой аналитической зависимости для давления насыщенного пара:

$$\frac{dp}{p} = \frac{\mu \cdot r}{R} \cdot \frac{dT}{T^2} = \frac{\mu \cdot r}{R} \cdot d\left(\frac{1}{T}\right)$$

Интегрируем обе части уравнения:

$$\ln p - \ln p_0 = \frac{\mu \cdot r}{R} \left[ \left(-\frac{1}{T}\right) - \left(-\frac{1}{T_0}\right) \right] = \frac{\mu \cdot r}{R} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)$$

$$\ln \frac{p}{p_0} = \frac{\mu \cdot r}{R} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \cdot \ln e = \ln \left\{ \exp \left[ \frac{\mu \cdot r}{R} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \right\}$$

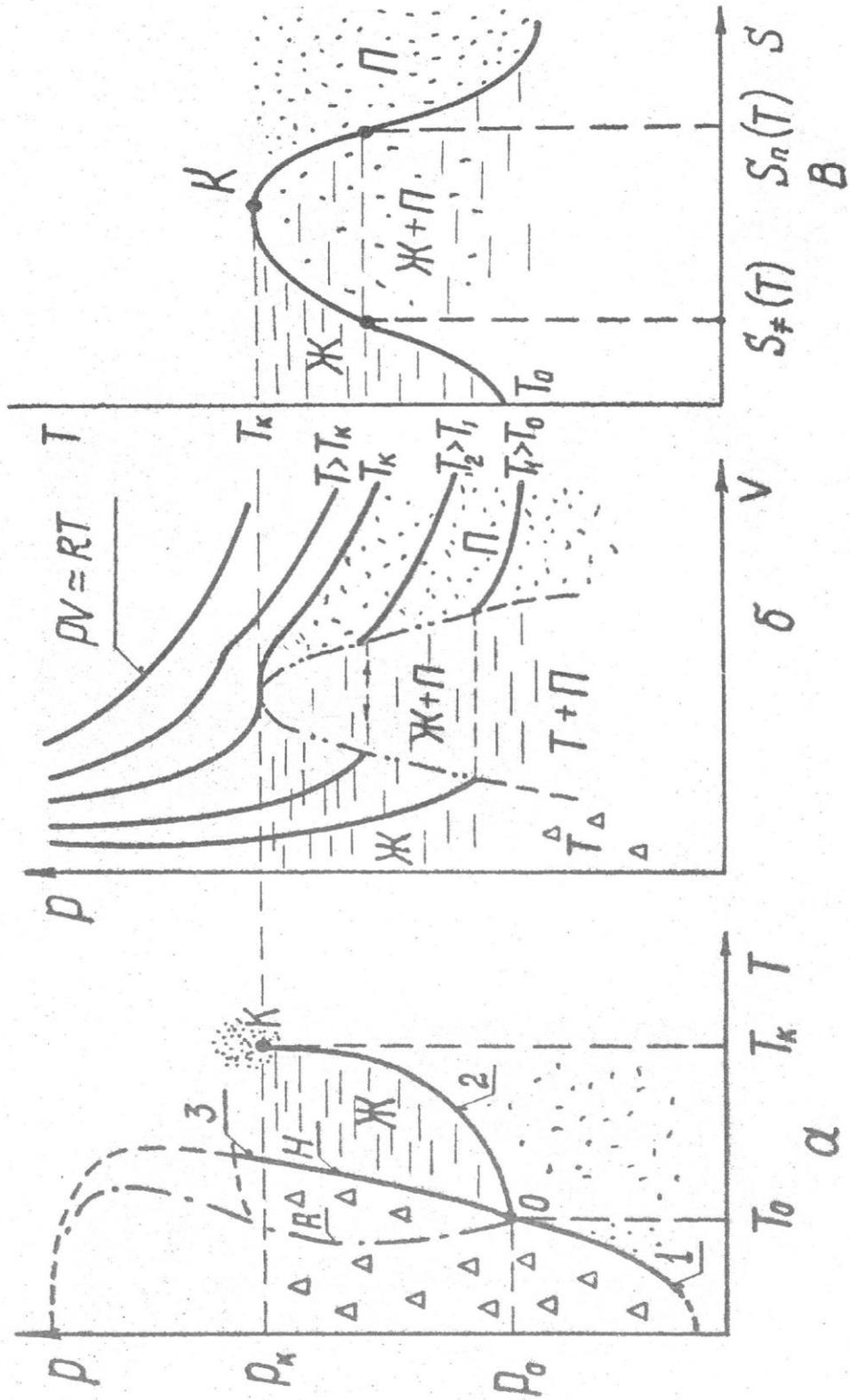


Рис. 1 Диаграммы состояния

Потенцируя, получим

$$p = p_0 \cdot \exp \left[ \frac{\mu \cdot r}{R} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (5)$$

де  $T_0$  и  $p_0$  – температура и давление в некоторой опорной точке на линии насыщения. Ею, в частности, может быть и тройная точка, однако в экспериментальной практике привязка к тройной точке совсем не обязательна.

Из соотношения (5) следует, что вдали от критической точки давление насыщенного пара растет с температурой практически по экспоненциальному закону, причем показатель экспоненты пропорционален мольной теплоте парообразования  $r^* = \mu \cdot r$ . Благодаря отмеченному обстоятельству, линию насыщения  $P(T)$  можно использовать для косвенного измерения теплоты парообразования.

На рассматриваемом участке  $P(T)$  расчет теплоты парообразования можно осуществлять, представляя экспериментально найденную зависимость  $P(T)$  в виде полулогарифмического графика  $\ln \left( \frac{p}{p_0} \right) = f \left( \frac{1}{T} \right)$  . . как показано на рис. 2.

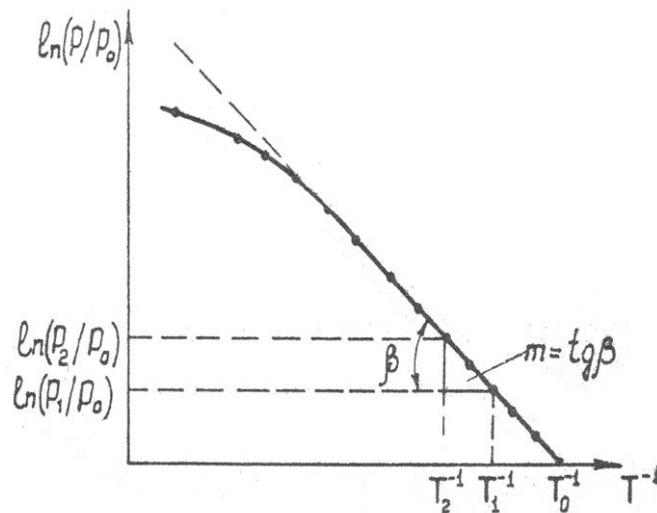


Рис . 2 Зависимость  $P(T)$

Тангенс угла наклона кривой  $\ln \left( \frac{p}{p_0} \right) = f \left( \frac{1}{T} \right)$

удобно определять, производя графическое дифференцирование сглаженной кривой на узких участках. В частности, на участке  $T_1 \div T_2$  со средней температурой  $T = 0,5(T_1 + T_2)$  соответственно с рис. 2

$$m(\bar{T}) = \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)^{-1} \left[ \ln \left( \frac{p_1}{p_0} \right) - \ln \left( \frac{p_2}{p_0} \right) \right] \quad (6)$$

и искомое значение удельной теплоты парообразования оказывается равным:

$$r(\bar{T}) = \frac{R}{\mu} \cdot m(\bar{T}) \quad (7)$$

При достаточно узких участках осреднения угла наклона кривой формулы (6) и (7) становятся справедливыми не только на строго экспоненциальном участке, но и на участках с заметно меняющейся теплотой парообразования, пока пар удовлетворяет уравнению состояния (3) [2].

Уравнение Клапейрона-Клаузиуса, будучи представленным в упрощенном виде (4), помимо рассмотренного выше допускает и другой, более универсальный (но с большими инструментальными ошибками) способ определения теплоты парообразования  $r(T)$ . Суть его сводится к графическому дифференцированию сглаженной экспериментальной кривой  $P(T)$  и отысканию входящей в уравнение (4) производной

$$\frac{dp}{dT} \approx \frac{\Delta p}{\Delta T} = b(T) \quad (8)$$

Чтобы повысить точность отыскания функции  $b(T)$ , следует обеспечить в опыте как можно более точную регистрацию экспериментальных точек  $P(T)$ , а затем построить по точкам сглаженную кривую  $P(T)$ , произвести кусочно-графическое дифференцирование кривой (вершины соседних прямоугольных треугольников при кусочном дифференцировании должны быть общими) и по полученным дискретным значениям производной  $b(T)$  построить графически сглаженную кривую  $b(T)$ .

При наличии функции  $b(T)$  удельная теплота парообразования  $r$  согласно уравнению (4) может вычисляться по формуле

$$r(T) = \frac{R}{\mu} \cdot \frac{T^2}{p} \cdot b(T) \quad (9)$$

В более общем случае на всем участке кривой насыщения ОК (см. рис. 1) для расчета  $r(T)$  придется использовать уравнение (1), откуда

$$r(T) = T(V_{II} - V_{ж.}) \cdot b(T) \quad (10)$$

Входящие в уравнение (10) значения удельных объемов  $V_{II}$  и  $V_{ж.}$  определяются из независимых опытов

Вдали от критической температуры  $T_k$  удельный объем жидкости  $V_{ж}$  сохраняется практически постоянным, а удельный объем пара  $V_{п}$  может, как уже отмечалось, вычисляться по формуле (3).

Помимо удельной теплоты парообразования  $r$  и удельных объемов  $V_{п}$ ,  $V_{ж}$  весьма важными термодинамическими характеристиками линии перехода «жидкость-пар» являются значения удельной энтропии  $S(T)$  и удельной энтальпии  $i(T)$  пара и жидкости.

В технической термодинамике энтальпию и энтропию обычно отсчитывают от тройной точки, принимая за нулевой уровень отсчета жидкую фазу. Энтропия насыщенного пара при произвольной температуре  $T$  рассчитывается, как правило, через независимо найденное значение энтропии жидкой фазы  $S^*(T)$  по вытекающей из выражения (2) формуле

$$S_{п} = S_{ж}(T) + \frac{r(T)}{T} \quad (11)$$

Вдали от критического состояния энтропия жидкости, как показывают опыты, слабо зависит от давления и обычно вычисляется по экспериментально найденным значениям изобарной теплоемкости  $C_{рж}$  с помощью соотношения

$$S_{ж}(T) = \int_{T_0}^T C_{рж}(T) dT / T = C_{рж} \ln(T/T_0) + S(T_0) \quad (12)$$

Аналогичным образом, если известны  $p(T)$ ,  $r(T)$  и  $C_{рж}(T)$  можно рассчитать значения удельной энтальпии жидкости  $i_{ж}$  и пара  $i_{п}$  вдоль всей линии насыщения. В частности, в далекой до критической области, где  $C_{рж} = \text{const}$  для этой цели могут использоваться относительно простые расчетные соотношения;

$$i_{ж}(T) = c_{рж}(T - T_0) + i_0(T) \quad (13)$$

$$i_{п} = i_{ж}(T) + r(T) \quad (14)$$

При более строгом изучении термодинамических характеристик вещества на линии перехода «жидкость-пар» с охватом области температур от тройной до критической приходится производить независимое экспериментальное определение удельной теплоты парообразования  $r$ , удельных объемов  $V_{п}$ ,  $V_{ж}$  и изобарной теплоемкости жидкости  $C_{рж}$

Описание экспериментальной установки.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 3.

В камере I высокого (до  $6 \cdot 10^5$  Па) давления парогенератора находится нагреватель 2, погруженный в жидкость. Краны 3, 4 соединяют парогенератор с дросселем 5 или с манометром 6. Температура в парогенераторе измеряется термопарой 7.

Подавая мощность питания, можно регулировать параметры на линии насыщения и измерять их непосредственно. При повышении давления до  $6 \cdot 10^5$  Па следует отключить нагреватель во избежание разгерметизации парогенератора или паропровода и возможных ожогов паром.

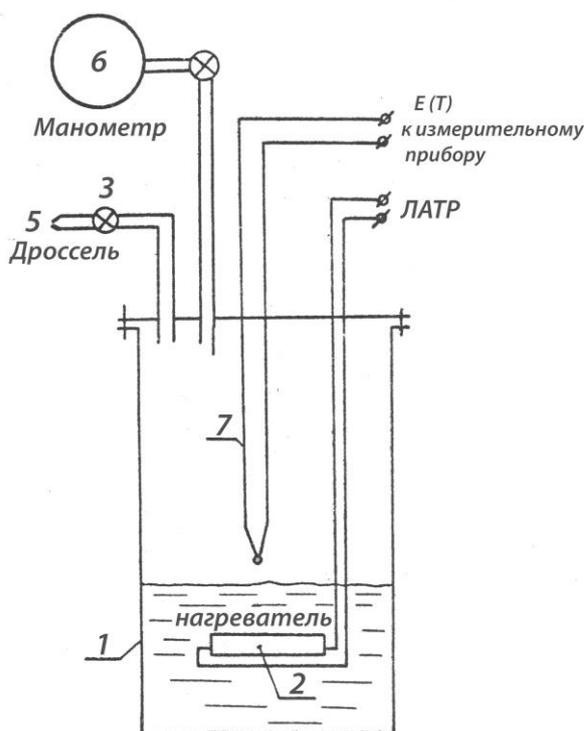


Рис. 3 Схема экспериментальной установки

#### Порядок проведения работы.

Экспериментальная часть работы сводится к измерению зависимости  $p(T)$  в режиме медленного разогрева. С этой целью необходимо:

1. Ознакомиться с конструкцией установки и измерительной схемы.
2. Записать наименования, марки и номера измерительных приборов, их класс точности и диапазон, в котором проводят измерения.
3. Получив у преподавателя разрешение (допуск к работе), подключить к сети измерительную аппаратуру.
4. Включить питание нагревателя (напряжение питания задается преподавателем).
5. В режиме медленного разогрева провести измерения зависимости  $P(T)$  в заданных точках через  $0,05 \cdot 10^5$  Па.
6. На установке отключение питания нагревателя производится при давлении  $p = 6 \cdot 10^5$  Па и повторный опыт проводится в режиме свободного охлаждения.

#### Обработка измерений и оформление отчета

1. Построить на миллиметровке график зависимости  $p(T)$  по результатам измерений  $p, T$ .
2. Графоаналитическим методом определить температурную зависимость теплоты парообразования  $r(T)$ .

3. Рассчитать по точкам через  $0,05 \cdot 10^5$  Па (рис. 3) значения удельной энтропии и удельной энтальпии для жидкости и пара на линии насыщения  $p(T)$ .

Примечание. Удельную изобарную теплоемкость воды в диапазоне  $300 \div 400$  К можно принимать, равной  $C_{рж} = 4,2 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К).

#### Особенности обработки опыта

Варианты обработки экспериментальной зависимости  $p(T)$  изложены в первой части руководства. Экспериментальные зависимости  $p(T)$ , полученные в режиме нагрева и охлаждения, целесообразно обрабатывать совместно, строя общую сглаженную кривую  $p(T)$ .

В отчет о проделанной работе следует включить:

- Основные расчетные формулы.
- Таблицу и графики экспериментальной зависимости  $p(T)$ .
- Промежуточные графики  $\ln(p/p_2) = f(1/T)$  и  $b(T)$ .
- Таблицы и графики значений  $r(T)$ ,  $S_{ж}$ ,  $S_{п}$ ,  $i_{ж}$ ,  $i_{п} = f(T)$ .

#### Примечания.

1. Точки в основных расчетных таблицах и графиках целесообразно брать для стандартных температур  $t = 30, 40, 50, 60, 70, 80$  и  $90$  °С.

2. На графики  $p$ ,  $r$ ,  $S_{ж}$ ,  $S_{п}$ ,  $i_{ж}$ ,  $i_{п} = f(T)$  необходимо нанести для сравнения литературные данные для воды [3].

#### Контрольные вопросы

- Каково определение фазовых переходов I и II рода? Изменением каких свойств вещества они сопровождаются?
- Изобразить диаграмму состояния вещества в  $p - T$  координатах. Показать линии фазовых переходов. Знать агрегатное состояние вещества в различных точках области  $p, T$ .
- Какова размерность основных параметров, входящих в расчетные соотношения?
- По каким формулам будет проведен расчет исследуемых параметров?
- Чем измеряют в опыте температуру, давление и с какой погрешностью единичного измерения?
- Каковы изменения  $p, T$  в опыте?
- Как и почему зависят от температуры параметры  $r$ ,  $S_{ж}$ ,  $S_{п}$ ,  $i_{ж}$ ,  $i_{п}(T)$ ?

Сравнить результаты измерений и справочные данные.

#### Литература

1. А.И. Ансельм Основы статистической физики и термодинамики. - СПб.: изд. «Лань», 2007.- 448с.
2. Е.С. Платунов Физика. Т.2. Молекулярная физика и термодинамика: Учебное пособие, 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2005. – 278 с.
3. Н.Б. Варгафтик Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: изд. «Наука», 1972.- 720 с.

### Лабораторная работа № 3

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АДИАБАТИЧЕСКОГО ДРОССЕЛИРОВАНИЯ РЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

Цель работы - ознакомление с реализацией дифференциального адиабатического дроссельного эффекта на экспериментальной установке, понятием температуры инверсии и температурного коэффициента дросселирования.

Адиабатическим дросселированием называют медленный необратимый переход газа или жидкости через гидравлическое препятствие без притока или оттока тепла, сопровождающийся резким спадом давления [1]. На практике дросселирование встречается при протекании газов или паров через пористые перегородки, диафрагмы или не полностью открытые вентили, краны.

Чтобы разобраться в физической природе и основных

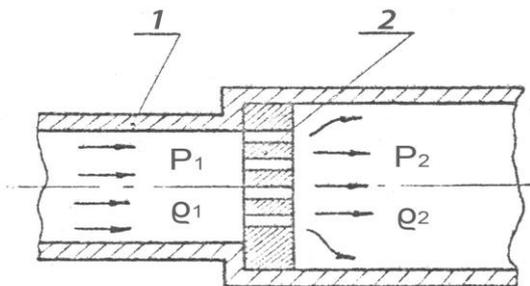


Рис. I Схема дросселирования газа

закономерностях дросселирования, обратимся к рис. I, где изображена труба I из теплоизоляционного материала, внутри которой находится пористая перегородка 2. Слева от перегородки газ имеет давление  $p_1$ , а справа  $p_2$ , причем  $p_1 > p_2$ .

Если отверстия в перегородке достаточно малы, то скорость течения газа будет ничтожно малой, и кинетической энергией его до и после перегородки можно пренебречь. Газ, проникая через перегородку, не совершает полезной внешней работы и не обменивается со средой энергией в форме теплоты. Следовательно, мы имеем здесь дело с изоэнтальпийным потоком газа.

Рассмотрим дифференциальный процесс дросселирования, сопровождающийся бесконечно малым изменением давления газа на перегородке, и применим к его анализу обобщенное дифференциальное уравнение первого и второго начала термодинамики:

$$di = TdS + Vdp \quad (1)$$

Из уравнения (1) при условии  $di = 0$  следует, что адиабатический процесс дросселирования ( $dp < 0$ ) должен всегда сопровождаться необратимым ростом энтропии газа:

$$dS = -\frac{V}{T} \cdot dp, \quad dS > 0 \quad (2)$$

В интегральном адиабатическом дроссельном процессе при конечном изменении давления  $\Delta p = p_2 - p_1$  суммарное приращение энтропии соответственно составляет

$$\Delta S = - \int_{p_1}^{p_2} (V/T) dp = -(V/T) \Delta p \quad (3)$$

Удельный объём газа  $V$  при дросселировании всегда увеличивается. Этого, однако, нельзя сказать об изменении температуры дросселируемого газа. Опыт показывает, что в зависимости от конкретных условий дросселирования (от конкретных значений давления  $p$  и температуры  $T$  газа до и после перегородки) газ может охладиться, нагреться или просто сохранить свою температуру. Эффект изменения температуры газа при адиабатическом дросселировании находит широкое практическое применение, особенно в системах охлаждения, поэтому рассмотрим этот вопрос более детально.

Итак, нас интересует частная производная

$$\left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_i = \alpha^{-1}, \quad \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_i = \alpha, \quad (4)$$

которую принято называть дифференциальным температурным эффектом дросселирования и обозначать через  $\alpha$ .

Возможны различные способы отыскания производной (4). В частности, для этого можно воспользоваться соответствующим дифференциальным

тождеством 
$$\left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_i \cdot \left( \frac{\partial p}{\partial i} \right)_T \cdot \left( \frac{\partial i}{\partial T} \right)_p = -1 \quad (5)$$

откуда

$$\left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_i = - \left( \frac{\partial i}{\partial p} \right)_T \cdot \left( \frac{\partial i}{\partial T} \right)_p^{-1} \quad (6)$$

Чтобы конкретизировать правую часть соотношения (6), обратимся к уравнению (I). Получаем

$$\left( \frac{\partial i}{\partial T} \right)_p = \left( \frac{\partial q}{\partial T} \right)_p = c_p; \quad \left( \frac{\partial i}{\partial p} \right)_T = T \cdot \left( \frac{\partial S}{\partial p} \right)_T + V \quad (7)$$

Заменим производную  $(\partial S / \partial p)_T$  с помощью соответствующего дифференциального соотношения Максвелла (сопряжение по потенциалам):

$$\left( \frac{\partial S}{\partial p} \right)_T = - \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \quad (8)$$

Следовательно, интересующее нас выражение для коэффициента  $\alpha_i$  приобретает вид

$$\alpha_i = \frac{1}{c_p} \left[ T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p - V \right] \quad (9)$$

Малому спаду давления  $dp$  при дросселировании отвечает малое изменение температуры (дифференциальный дроссель-эффект):

$$dT = \frac{1}{c_p} \left[ T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p - V \right] \cdot dp \quad (10)$$

Изменение температуры газа при дросселировании с большим сбросом давления (интегральный дроссель-эффект) можно вычислить путем интегрирования (10):

$$T_1 - T_2 = \int_{p_1}^{p_2} \frac{1}{c_p} \left[ T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p - V \right] \cdot dp \quad (11)$$

Проанализируем выражение (9) для двух наиболее важных частных уравнений состояния газов.

Идеальный газ, подчиняющийся уравнению Клапейрона-Менделеева,  
 $pV = RT$  (12)

Из уравнения (12) имеем

$$\left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p = \frac{R}{p} = \frac{V}{T} \quad (13)$$

Подставляя уравнение (13) в выражение (9), убеждаемся, что у идеальных газов дроссельный эффект отсутствует:

$$\alpha = \frac{1}{c_p} \left[ T \frac{V}{T} - V \right] = 0$$

Объяснить полученный результат можно тем, что в модели идеального газа отсутствуют силы межмолекулярного взаимодействия и внутренняя энергия является, как известно, только лишь функцией температуры.

Реальный газ, подчиняющийся уравнению Ван-дер-Ваальса

$$\left( p + \frac{a}{V^2} \right) (V - b) = RT \quad (14)$$

Интересующая нас частная производная  $(\partial V)/(\partial T)_p$  для вандерваальсовского газа в соответствии с уравнением (14) имеет вид:

$$\left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p = R \left[ p - \frac{a}{V^2} + \frac{2ab}{V^3} \right]^{-1} \quad (15)$$

поэтому для коэффициента  $\alpha$  справедливо соотношение

$$\alpha = \frac{1}{c_p} \left( RT \left( p - \frac{a}{V^2} + \frac{2ab}{V^3} \right)^{-1} - V \right) \quad (16)$$

или иначе

$$\alpha = \frac{1}{c_p} \cdot \frac{\frac{2a}{V} - \left( p + \frac{3a}{V^2} \right) b}{p - \frac{a}{V^2} + \frac{2ab}{V^3}} \quad (17)$$

Выражение для  $\alpha$ , к сожалению, является довольно громоздким, однако вполне допускает качественный анализ. Так, два последних члена в знаменателе играют роль поправок к давлению  $p$ . Следовательно, знаменатель формулы (17) всегда остается положительным и в случае необходимости допускает упрощения. В свою очередь, слагаемые числителя, если их сравнивать между собой, подразделяются на две группы: члены  $2a/V$  и  $p \cdot b$  в общем случае могут рассматриваться величинами одного порядка, а член  $3ab/V^2$  - поправкой к ним. Наличие в числителе разности членов одного порядка приводит к тому, что в зависимости от конкретного сочетания давлений и температуры вандерваальсовский газ может иметь дроссельный эффект, различный как по величине, так и по знаку коэффициента  $\alpha$  [2].

Чтобы убедиться в этом, достаточно ограничиться анализом соотношения (17) в нулевом приближении (отбросить из числителя и знаменателя все поправки). Для выбранного частного состояния газов вместо выражения (17) получаем

$$\alpha = \frac{1}{c_p} \cdot \frac{2a - pVb}{pV} \quad (18)$$

Учитывая приближенный характер соотношения (18), дополнительно упростим его путем замены комплекса  $pV$  на  $RT$  (уравнение Клапейрона-Менделеева – нулевое приближение уравнения Ван-дер-Ваальса и такая замена справедлива с точностью до поправки первого порядка малости). Получаем

$$\alpha = \frac{2a - RTb}{c_p RT} \quad (19)$$

Выражение (19) удобно тем, что в нем содержится всего один параметр состояния - температура  $T$ . Из соотношения (19) однозначно следует, что по мере роста температуры газа  $T$  дроссельный эффект изменяется. В области низких значений  $T$ , удовлетворяющих неравенству

$$T < \frac{2a}{Rb} \quad (20)$$

коэффициент  $\alpha > 0$  (положительный дроссельный эффект), и газ при

дросселировании охлаждается. Наоборот, в области высоких температур, когда выполняется неравенство

$$T > \frac{2a}{Rb} \quad (21)$$

коэффициент  $\alpha < 0$  (отрицательный дроссельный эффект), поэтому газ нагревается.

Температуру  $T$ , при которой дроссельный эффект исчезает  $\alpha=0$ , называют температурой (точкой) инверсии газа. Ее значение определяется постоянными в уравнении Ван-дер-Ваальса и она соответственно равна

$$T_i = \frac{2a}{Rb} \quad (22)$$

Приближенный анализ позволил получить довольно наглядную связь дроссельного эффекта с температурой газа.

Строгий анализ выражения (16) для  $\alpha$  приводит, однако, к новым количественным и качественным результатам. В частности, условие  $\alpha=0$  в выражении (16) соответствует не одной точке инверсии  $T_i$ , а целому семейству таких точек, образующих кривую инверсии газа. Кривая инверсии имеет четко выраженный максимум и, если ее представить в безразмерных координатах

$$\tau = T/T_{кр}, \quad \pi = p/p_{кр} \quad (23)$$

приобретает универсальный вид, изображений на рисунке 2. Здесь  $p_{кр}$  и  $T_{кр}$  - критическое значение давления и температуры газа.

Максимум на кривой инверсии соответствует параметрам  $p_{макс} = 9p_{кр}$ ,  $T_{макс} = 3T_{кр}$ .

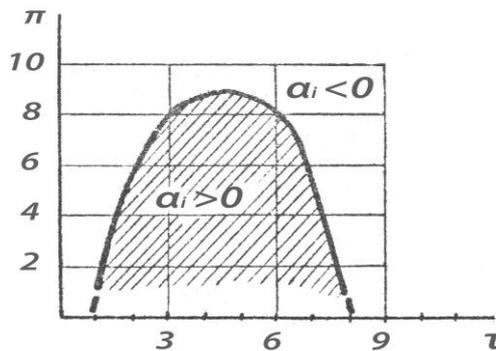


Рис.2 Кривая инверсии

При давлениях  $p < P_{макс}$  реальный газ обладает не одной, а двумя точками (температурами) инверсии  $T_{i1}$  и  $T_{i2}$  и в промежуточной между ними области имеют положительный дроссельный эффект. Найденное выше, в уравнении (22), приближенное значение для точки инверсии соответствует, оказывается, правой точке пересечения инверсионной кривой с осью абсцисс. Действительно, если учесть, что в уравнении Ван-дер-Ваальса

$$T_i = 2a/Rb = 27/4 T_{кр} = 6,7 T_{кр}$$

Левая ветвь инверсионной кривой пересекает ось абсцисс в точке с температурой  $T_i = 0,75T_{кр}$

В заключение уместно отметить, что реальные газы в общем случае нельзя считать строго вандерваальсовскими. Подтверждением этому служит опыт. В частности, экспериментальные кривые инверсии газов весьма существенно отличаются от приведенной на рис. 2 расчетной кривой.

#### Описание лабораторной установки

Основные элементы лабораторной установки показаны на рис. 3. Сжатый газ подается к установке от стационарного баллона (на рисунке не показан) при помощи гибкой металлической трубки, проникает через теплоизоляционную дроссельную пробку 2 к регулировочному вентилю 4 и после него попадает в атмосферу. Избыточное давление газа перед дросселем и после него регистрируется пружинными манометрами 1 и 3. Термопарная система установки позволяет регистрировать непосредственно температуру газа на входе в дроссельное устройство  $T$  и спад температуры  $\Delta T$  - после дросселя.

Для расчета  $T$  и  $\Delta T$  справедлива формула

$$T = 293,2 + K_T n_T,$$

где  $K_T$  - коэффициент чувствительности микровольтметра, град/дел; 293,2 - комнатная температура (точнее, температура блока холодных спаев);  $n_T$  - отклонения стрелки микровольтметра при измерении  $T$  и  $\Delta T$  в делениях шкалы.

#### Рис.3 Схема лабораторной установки

1 - манометр для измерения входного давления; 2 - дроссель (пробка с отверстием); 3 - манометр для измерения давления после дросселя; 4 - вентиль для подпора давления в дросселе; 5, 6 - термопары; 7 - блок холодных спаев; 8 - переключатель термопар; 9 - микровольтметр.

#### Задание по работе

Освоить теорию дроссельного эффекта и разобраться в особенностях работы лабораторной установки.

Исследовать дроссельный эффект при 3-5 различных значениях входного давления  $p_1$  (давление выбирается по указанию преподавателя). Результаты каждой серии измерений следует представить в виде таблицы со столбцами  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $T$ ,  $\Delta T$ ,  $\Delta p$  и  $\alpha$

Измерения необходимо проводить в условиях относительно небольшого спада давления на дросселе (при  $\Delta p = 0,05 \div 0,3$  МПа). Регулировка величины  $\Delta p$  производится при помощи вентиля 4.

Построить экспериментальный график  $\alpha(p_1)$

Построить график расчетных значений  $\alpha(p_1)$  выбрав в качестве опорных соответствующие экспериментальные значения температуры и давления газа, и сопоставить его с экспериментальными. Расчет  $\alpha$  можно проводить, используя приведенные выше формулы (17) – (20). Необходимые для расчетов данные сведены для воздуха, азота и аргона в табл. I.

Критические значения температуры  $T_{кр}$  и давления  $p_{кр}$  связаны с постоянными уравнения Ван-дер-Ваальса известными соотношениями:

$$T_{кр} = \frac{8}{27} \cdot \frac{a}{Rb}; \quad p_{кр} = \frac{1}{27} \cdot \frac{a}{b^2}.$$

Таблица 1.

газ	$T_{кр}, K$	$P_{кр}, Pa$	$C_p,$ Дж/(кг·К)	$\mu,$ кг/кмоль	$R,$ Дж/(кмоль·К)
Воздух	132,4	$37,2 \cdot 10^5$	1006	29	8314
Азот	126,0	$33,5 \cdot 10^5$	1030	28	8314
Аргон	150,7	$48,0 \cdot 10^5$	523	39,9	8314

#### Порядок выполнения лабораторной работы

1. Включить в присутствии лаборанта или преподавателя компрессор для накачки баллона до 106 Па.
2. За время достижения рабочего давления разобраться в основных теоретических положениях работы и в ее принципиальной схеме.
3. При достижении рабочего давления в баллоне выключить компрессор.
4. Открыть редуктор баллона и установить по манометру  $p_1$ , заданное преподавателем.
5. Провести измерения  $p_1, T_1, \Delta T$  закрыть редуктор баллона.
6. Данные по  $p_1, p_2, T_1, \Delta T$  и  $\alpha(T)$  в таблицу.
7. Открыть редуктор баллона и установить новое значение заданного давления  $p_1$ .
8. Выполнить пункты 4-6 для пяти заданных значений давления.
9. Построить необходимые графики.

В отчет должны войти следующие разделы:

- основные расчетные формулы;
- схема установки и объяснение ее работы с краткой характеристикой использованных приборов;
- таблица экспериментальных данных;
- расчетные значения коэффициента  $\alpha$  с показом промежуточных выкладок;
- графики экспериментальных и расчетных значений коэффициента  $\alpha$  с качественным объяснением имеющихся между ними расхождений.

#### Контрольные вопросы

- Что такое температура инверсии?
- Чем отличается изотермическое расширение газа от дросселирования?

- Почему процесс дросселирования необратим?
- Объясните принципиальную схему тракта лабораторной установки.
- Как изменяется плотность газа при дросселировании?
- Какую минимальную температуру газа можно получить при дросселировании его от комнатной температуры?

#### Литература

1. Е.С. Платунов. Физика. Т.2. Молекулярная физика и термодинамика: Учебное пособие, 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2005. – 278 с.
2. Ю.И. Тюрин, И.П. Чернов, Ю.Ю. Крючков Физика. Молекулярная физика. Термодинамика.- СПб.: изд. «Лань», 2008.- 228с.

## Лабораторная работа № 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Цель работы - экспериментальное определение теплоемкости твердых тел при постоянном объеме.

Знание теплоемкости твердых тел необходимо для использования этих данных в расчетах тепловых процессов и режимов работы различных устройств, конструкций, приборов (прикладное значение) и для получения знаний о природе исследуемого вещества (теоретическое значение).

Основы теории. Из курса общей физики известно, что теплоемкость твердых тел при нормальных условиях практически не зависит от температуры и может быть по правилу Дюлонга и Пти для одного моля  $C_{\mu}$  одноатомного вещества в виде [1]:  $c_{V\mu} = 3R \approx 25$ , Дж·моль<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>,

где  $R$  - универсальная газовая постоянная;  $R = 8,314$  Дж·моль<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>.

Удельная (массовая) теплоемкость  $C_V$  выражается

$$c_V = \frac{1}{\mu} c_{V\mu}, \quad \text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}. \quad (1)$$

Для вещества, состоящего из многоатомных молекул, теплоемкость выражается

$$C_{\mu v} = 3nR \quad (2)$$

где  $n$  - число атомов, образующих молекулу.

Однако из курса термодинамики известно, что при проведении измерений теплоемкости в широком диапазоне температур выявляется существенная зависимость теплоемкости от температуры  $T$  (рис. I).

Масштабы изменения теплоемкости могут быть оценены методами термодинамики, но вид функциональной зависимости  $C_V(T)$  удастся получить лишь с помощью статистической физики и квантовой

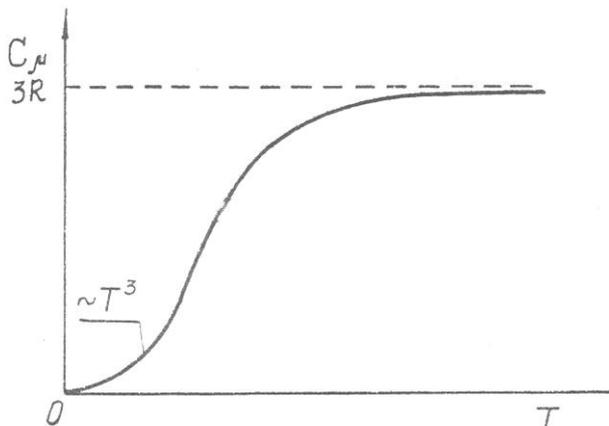


Рис. I Зависимость теплоемкости от температуры

Достаточно корректное приближенное выражение было получено Дебаем в виде

$$c_{V\mu}(T) = \frac{d}{dT} \left\{ 9RT \left( \frac{T}{T_D} \right)^3 \int_0^{t_D} \frac{t^3 dt}{\exp t - 1} \right\}, \quad (3)$$

$$t = h\nu/kt, \quad t_D = h\nu_D/kt, \quad T_D = h\nu_D/k$$

где  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж\*с - постоянная Планка;  $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж\*К<sup>-1</sup> - постоянная Больцмана;  $\nu_D$  характеристическая (предельная максимальная частота Дебая колебаний атомов в твердом теле, с<sup>-1</sup>);  $T_D$  - характеристическая температура Дебая, К.

Интеграл в правой части уравнения (3) не имеет решения в явной форме для всего диапазона изменения  $T$ , но для предельных случаев (высоких  $T > T_D$  и низких  $T < T_D$  температур) зависимость  $C_v(T)$  можно выразить как

$$C_{\mu\nu} = 234R(T/T_D)^3, \quad T < T_D \quad (4)$$

$$C_{\mu\nu} = 3R - 3R/20(T_D/T)^2, \quad T > T_D \quad (5)$$

Соотношения (3-5) для многих практически важных материалов дают хорошее соответствие с экспериментальными данными. Однако сами значения температуры Дебая  $T_D$  не поддаются прямому измерению и обычно подбираются методом подгонки таким образом, чтобы вычисленные значения теплоемкости при различных температурах лучшим образом совпадали с измеренными величинами, после чего используются в расчетах  $C_v(T)$ .

#### Экспериментальное определение теплоемкости твердых тел

Метод основан на сравнении скоростей охлаждения образцов из испытуемого вещества и вещества с известной теплоемкостью (эталоны) при одинаковых условиях охлаждения (сравнительный метод) [2]. Одинаковые условия охлаждения обеспечиваются равенством температур среды и коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$  (Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-1</sup>) охлаждаемых тел. Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  определяет количество тепла  $Q$ , теряемое единицей поверхности тела за единицу времени при разности температур между поверхностью и средой (оболочкой) в один градус.

Коэффициенты теплоотдачи будут равными, если образцы имеют одинаковую форму и размеры, а также если степень черноты их поверхностей одинаковы.

Итак, два образца, выполненные в виде цилиндров, из испытуемого и эталонного веществ, предварительно разогреты в блоке разогрева, охлаждаются

по очереди в устройстве, названном калориметром. Калориметр представляет собой толстостенный полый цилиндр, внутри которого размещаются образцы. Большая масса и, соответственно, большая теплоемкость калориметра обеспечивает малое изменение температуры внешней среды  $T_{cp}$  в процессе охлаждения. Степень черноты поверхности у них одинакова.

При охлаждении исследуемый образец отдает корпусу калориметра тепловую энергию, количество которой за промежуток времени определяется равенством

$$(\Delta Q / \Delta \tau) = -M \cdot c_v (\Delta T / \Delta \tau) \quad (6)$$

где  $M$  - масса тела, кг;  $C_v$  - удельная теплоемкость материала;  $\Delta T$  - изменение температуры тела (знак "-" показывает, что тело теряет тепло) за время  $\Delta \tau$ . Эта тепловая энергия рассеивается в оболочку через поверхность образца  $S$  и равна

$$(\Delta Q / \Delta \tau) = \alpha \cdot S \cdot (T - T_{cp}) = \alpha \cdot S \cdot \Delta T(\tau) \quad (7)$$

где  $\Delta \tau$  - промежуток времени, за который производится измерение;

$\Delta T$  - разность температур поверхности и среды. Из выражений (6) и (7) имеем для образца и эталона

$$-M \cdot c_v \cdot (\Delta T / \Delta \tau) = \alpha \cdot S \cdot \Delta T, \quad -M_{\text{э}} \cdot c_{v\text{э}} \cdot (\Delta T / \Delta \tau) = \alpha \cdot S \cdot \Delta T_{\text{э}} \quad (8)$$

Так как величины поверхностей, степени черноты и коэффициент теплоотдачи исследуемого образца и эталона одинаковы, т.е.

$$\alpha = \alpha_{\text{э}}, \quad S = S_{\text{э}}, \quad \alpha S = \alpha_{\text{э}} S_{\text{э}}$$

то получаем

$$M \cdot c_v \cdot \left( \frac{\Delta T}{\Delta \tau} \right) = M_{\text{э}} \cdot c_{v\text{э}} \cdot \left( \frac{\Delta T_{\text{э}}}{\Delta \tau} \right) \quad (9)$$

Из уравнения (9) имеем

$$c_v = \frac{M_{\text{э}}}{M} \cdot c_{v\text{э}} \cdot \left( \frac{\Delta T}{\Delta \tau} \right)_{\text{э}} / \left( \frac{\Delta T}{\Delta \tau} \right) \quad (10)$$

Вели опыт построить так, что исходные перепады температур при охлаждении исследуемого и эталонного образцов одинаковы, тогда  $\Delta T = \Delta T_{\text{э}}$ , и из выражения (10) получаем

$$c_v = \frac{M_{\text{э}}}{M} \cdot c_{v\text{э}} \cdot \frac{\Delta \tau}{\Delta \tau_{\text{э}}} \quad (11)$$

По формуле (11) можно определить удельную теплоемкость. Для этого надо взвесить эталонный и исследуемый образцы  $M_{\text{э}}$ ,  $M$  и получить  $\Delta \tau$ ,  $\Delta \tau_{\text{э}}$  из опыта. Удельная теплоемкость эталонного материала берется из таблиц. В

нашем случае за эталон взят медный образец. Для меди удельная теплоемкость при комнатной температуре равна  $C_{\Sigma} = 390 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

#### Описание экспериментальной установки

Калориметр для измерения  $C_v$  состоит из:

- блока с гнездами для нагрева образцов на 5-7 К (можно нагреть и в руке);
- калориметра для охлаждения образцов;
- пульта управления
- цифрового микровольтметра;
- коробки для хранения образцов.

Для измерения температур используется термопара, присоединенная к регистрирующему устройству (5)

Эксперимент проводился таким образом, чтобы при охлаждении образцов измерялось время прохождения стрелкой (или световым зайчиком) гальванометра от деления N2 до N1 во всех опытах, т.е.

$$\Delta N = \text{const}, \Delta T = \text{const} \quad (12)$$

Значения N1 и N2 задаются преподавателем.

Блок разогрева имеет электрический нагреватель, питаемый от сети. Температура блока также измеряется при помощи термопары, введенной в ее корпус. В цилиндрические отверстия блока вставляются образцы и прогреваются в нем до определенной температуры (соответствующее показанию гальванометра N3).

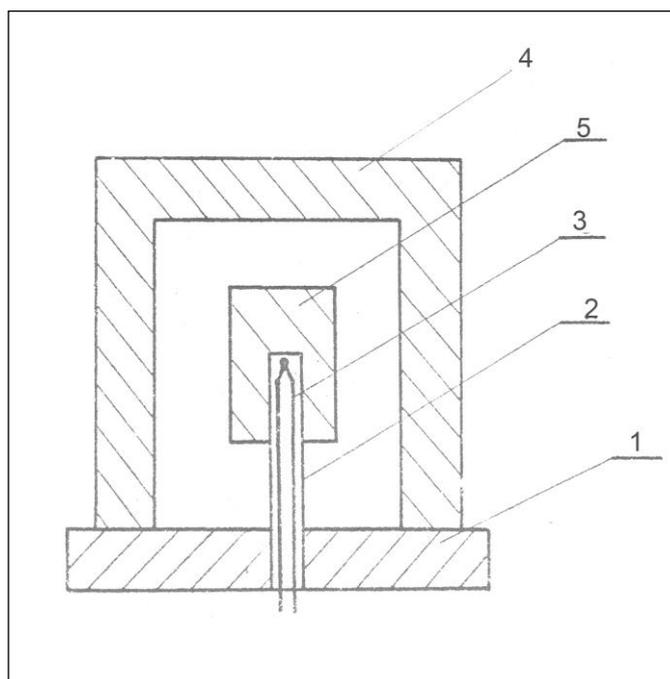


Рис.2 Схема калориметра

Схема калориметра представлена на рис. 2. Он состоит из основания I, в котором вделана игла 2, внутри которой располагается термопара 3. Металлический корпус 4 может подниматься и отводиться в сторону. Образцы 5 исследуемого и эталонного веществ имеют отверстия под иглу, на которую сажаются во время

эксперимента. Затем система закрывается корпусом и происходит охлаждение образцов.

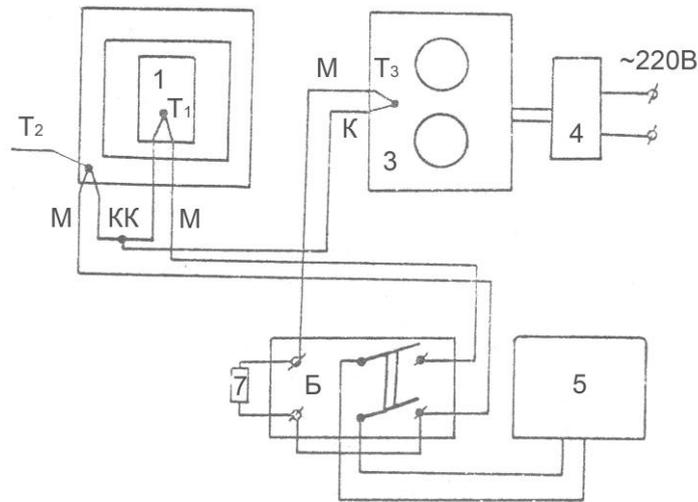


Рис. 3 Электрическая схема

Электрическая схема показана на рис. 3. Цепь нагревателя 3 включается кнопкой, выведенной на корпус блока разогрева от трансформатора 4. Кнопка б одновременно работает в цепи термопар. При нажатой кнопке к гальванометру подключается дифференциальная термопара  $\Delta T = T_3 - T_2$ , измеряющая перегрев блока. Пока идет нагрев образцов 1 кнопка должна быть все время нажата. В это время ведутся наблюдения за показанием гальванометра. Когда показание гальванометра достигнет значения  $N_3$ , кнопка отпускается, и образец 1 переносится из блока разогрева в калориметр 2. В термопарной цепи включается цепь термопары перегрева  $\Delta T = T_2 - T_1$  образца (через переключатель, выведенный на пульт управления). Переключатель может устанавливаться в двух положениях "опыт" и "контроль". "Контроль" необходим для проверки установки на ноль гальванометра. При наблюдении за охлаждением образцов переключатель ставится в положение "Опыт".

#### Порядок выполнения работы:

1. Ознакомиться с принципом работы и устройством экспериментальной установки и измерительной схемы.
2. Зависать наименования, марки и номера измерительных приборов, их класс точности и диапазон, в которых будут проведены измерения.
3. Получить образцы исследуемых материалов и взвесить их на лабораторных весах с погрешностью 0,1 г.

4. Получив разрешение преподавателя, включить измерительную аппаратуру ( $\sim 220$  В).

5. Калориметр (блок разогрева) подключить к сети 220 В.

6. Образцы, полученные для измерений, установить в гнезда блока разогрева и включить кнопку (на 30-60 с). Образцы можно разогреть и в руке (30-60 с).

7. Поставить переключатель в положение "Опыт". Корпус калориметра поднять и отвести в сторону. Нагретый образец посадить на иглу с термопарой и закрыть корпус.

8. Наблюдать за движением светового "зайчика" по шкале гальванометра. В момент прохода деления  $N_2$  включить секундомер, а в момент прохода деления  $N_1$  остановить секундомер и записать показания  $\Delta\tau_1, \Delta\tau_2$  в таблицу.

Образец № _____, масса	$10^{-3}$ кг					
Опыт №	1	2	3	4	5	6
$\Delta\tau_1, \text{с}$						
$\Delta\tau_2, \text{с}$						

Провести измерения заданное количество раз  $N_{\text{изм}} = (4 \div 5)$  на всех образцах. Опыт на эталонном образце (медь) провести 3 раза. Взвесить образцы на лабораторных весах.

9. Сообщить преподавателю о завершении программы эксперимента и отключить приборы. Гальванометр установить на арретир. Подписать результаты измерений.

#### Обработка результатов и оформление отчета:

1. Произвести расчеты теплоемкости исследуемых образцов по формуле (11) с учетом, что теплоемкость меди  $C_v = 330$  Дж/(кг·К).

2. Оценить относительную погрешность единичного измерения теплоемкости, приняв  $\Delta C_{v\text{э}}/C_{v\text{э}} = 2\%$ .

#### Контрольные вопросы

- Каково определение удельной и полной теплоемкости и их размерность?
- Отличаются ли удельные теплоемкости  $C_v$  и  $C_p$  у твердых тел?
- Каков характер зависимости  $C_v(T)$  твердых тел в широком диапазоне температур? (Рассчитать  $C_v(T)$  для заданной температуры Дебая).
- В чем заключается идея метода измерения теплоемкости?
- Какими приборами и устройствами измеряется температура в опыте и как оценить погрешность ее измерения?

- Будет ли изменяться погрешность с увеличением числа измерений  $N_{\text{изм}}$  и каким образом? В каких пределах?

#### Литература

1. М.А. Леонтович. Введение в термодинамику. Статистическая физика. СПб.: изд. «Лань», 2008.- 432с.
2. Е.С. Платунов. Физика. Т.2. Молекулярная физика и термодинамика: Учебное пособие, 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2005. – 278 с.

## Лабораторная работа № 5

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ В ПРОТОЧНОМ КАЛОРИМЕТРЕ

Цель работы - экспериментальное определение теплоемкости жидкостей и газов при постоянном давлении.

Знание теплоемкости жидкостей и газов необходимо для использования этих данных в расчетах процессов тепло- и массо- обмена при проектировании технических устройств, конструкций и технологических процессов (прикладное значение) и для получения знаний о природе исследуемого вещества (теоретическое значение).

Основы теории метода. Исследуемое вещество (жидкость или газ) непрерывно с постоянным расходом  $G$ ,  $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}$  при постоянном давлении  $p$  протекает через измерительную ячейку (рис. 1), обтекая нагреватель (электрический) постоянной мощности [1-3]:

$$W_{эл} = \Delta U \cdot I = I^2 \cdot R_H, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где  $\Delta U$  - падение напряжения на нагревателе, В;  $I$  - ток, А;  $R_H$  - сопротивление нагревателя, Ом.

Тепловая энергия, выделяемая нагревателем при отсутствии (или малости) тепловых потерь во внешнюю среду ( $S=\text{const}$ , адиабатические условия на поверхности измерительной ячейки), будет затрачена на:

- изменение удельной энтальпии  $i(s,p)$ ,  $\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}$  вещества;
- изменение кинетической энергии потока в измерительной ячейке за счет возможного изменения скорости  $\omega$ ,  $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$  потока,  $\Delta E_{кин} = 0,5G(\omega_{вх}^2 - \omega_{вых}^2)$  и потерь кинетической энергии на трение (жидкости, газа) и на работу расширения  $\Delta A = p \cdot \Delta V$ .

При изучении жидкостей на данной лабораторной установке потери на трение, работа расширения  $\Delta A$  и  $\Delta E_{кин}$  пренебрежимо малы.

При измерении теплоемкости газа следует оценить ожидаемую величину  $\Delta A$  из-за изменения удельного объема газа при нагреве его в измерительной ячейке и учесть ее, если она составляет более 5% от изменения энтальпии  $\Delta i$ . Уравнение сохранения энергии в этом случае можно записать в виде

$$W_{эл} = [i_{вых}(T) - i_{вх}(T_{вх})] \cdot G + W_{ут} \quad (2)$$

где  $W_{ут}$  - тепловой поток утечек в окружающую среду.

Тогда изменение энтальпии жидкости (газа) будет определено

затратами мощности нагревателя и величиной потерь:

$$W_{\text{эл}} \approx (i_{\text{ВЫХ}} - i_{\text{ВХ}}) \cdot G + W_{\text{УТ}} \quad (3)$$

или

$$\Delta i = (W_{\text{эл}} - W_{\text{УТ}}) / G \quad (4)$$

Удельная энтальпия связана с внешними условиями  $T$  и  $p$  выражением

$$di = C_p dT + (\partial i / \partial p)_T \cdot dp \quad (5)$$

Если в исследуемой области  $T, p$  производная  $(\partial i / \partial p)_T$  мала и  $dp \approx 0$ , то

$$C_p = \left. \frac{di}{dT} \right|_p = \frac{W_{\text{эл}} - W_{\text{УТ}}}{G(T_{\text{ВЫХ}} - T_{\text{ВХ}})} \quad (6)$$

где  $T$  - температура, К.

Если  $W_{\text{УТ}} \ll W_{\text{эл}}$  (оценивается при настройке установки), то утечками можно пренебречь.

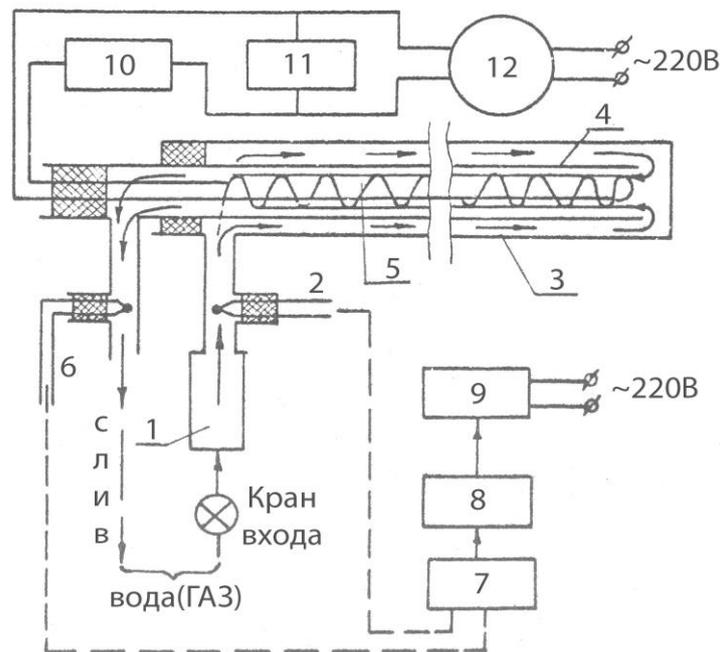


Рис. 1 Схема экспериментальной установки

#### Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис.1) состоит из одного (или двух) калориметров (измерительных ячеек) К1 (К2), изготовленных из стеклянных или металлических соосных труб.

Обычно опыт проводится при одном работающем калориметре. Вторым калориметр - запасной либо выполняет функции предварительного подогревателя К1, изменяющего температуру вещества в широких пределах при измерении зависимости  $c_p(T)$  на калориметре К2. На лицевой панели устройства установлены: расходомер РС, переключатель термодатчиков ПТ ( $T_{\text{ВХ1}}, \Delta T, T_{\text{ВЫХ}}$ ),  $T_{\text{ВХ2}}, \Delta T_2$ , клеммы для измерения ЭДС термодатчиков  $E(T_i), \Delta E(T_i)$  одним из измерительных приборов (гальванометром М 195/1, цифровым микровольтметром, например ВК 2-20, или аналогичным прибором, самописцем КСП-4 (ЭПП-09), индикаторные панели И1, И2 и выключатели нагревателей.

На задней панели расположены электрические клеммы подключения нагревателей, вводы и выходы жидкости или газа.

### Техническое задание и порядок проведения работы

Экспериментальная часть заключается в измерении температуры входа  $T_{\text{ВХ}}$  и перепада температур  $\Delta T = (T_{\text{ВЫХ}} - T_{\text{ВХ}})$  установившемся (стационарном) режиме при заданных (по указанию преподавателя) значениях расхода  $G$  рабочего вещества и мощности  $W_{\text{эл}}$  (или падения напряжения  $\Delta U$  на нагревателе с известным омическим сопротивлением  $R$ ). С этой целью необходимо следующее:

1. Ознакомиться с принципом работы и конструкцией экспериментальной установки и измерительной схемы.

2. Записать наименования, марки и номера измерительных приборов, их класс точности и диапазон, в которых проводятся измерения.

3. Получив разрешение преподавателя (допуск к началу работы), подать на установку поток рабочего вещества (вода от сети, воздух от компрессора или иной газ из баллона), установив краном расходомера (или регулятора) заданные значения расхода  $G$ .

4. Установить рукоятку выходного напряжения на лабораторном автотрансформаторе ЛАТР на "0", подключить ЛАТР к сети и затем установить (по вольтметру) рукояткой регулировки заданную величину напряжения питания нагревателя. Переключателем П1 (см. рис. 2) на лицевой панели установки подать напряжение питания на нагреватель. Включить приборы для измерения температуры и перепада температур. Следить за показаниями расходомера, и в случае существенных отклонений от заданного ( $>10\%$ ) подрегулировать расход вентилем (краном) расходомера.

5. При наступлении стационарного режима (ориентировочное время узнать у преподавателя) провести измерения ЭДС термодатчиков  $E_{\text{ВХ}}, E(T), G$  и  $W_{\text{эл}} = I^2 R$  и записать их в таблицу.

6. Сообщить преподавателю о завершении заданной программы эксперимента и отключить нагреватели. Рукояткой "ЛАТР"а убрать до "0" напряжение питания и отключить ЛАТР от сети 220В. Кранами (водопроводной сети, компрессора или баллона) перекрыть подачу рабочего вещества.

7. Показать результаты измерений преподавателю и подписать их.

#### Содержание отчета

В отчет включить:

1. Основные расчетные формулы.
2. Таблицы значения заданных и измеряемых параметров.
3. Оценку погрешности единичного измерения.
4. Сопоставление результатов измерений со справочными данными, расхождение в процентах  $(\Delta C_p / C_{p \text{ справ}}) \cdot 100\%$ .

#### Контрольные вопросы

1. Дать определения энтальпии и теплоемкости.
2. В чем заключается идея метода их измерения?
3. Какова размерность параметров, входящих в расчетные соотношения?
4. Что измеряется в опыте? Как (прямо или косвенно)? Какими приборами (их класс точности, погрешность единичного измерения)?
5. Каков диапазон изменения определяющих и измеряемых параметров в опытах?
6. Из каких составляющих складывается погрешность измерения теплоемкости?
7. Каким способом можно уменьшить отдельные составляющие погрешности измерений?
8. В каких режимах измерения  $(G, \Delta T, W_{эл})$  погрешность  $\Delta C_p / C_p$  будет максимальной?

#### Литература

1. М.А. Леонтович Введение в термодинамику. Статистическая физика. СПб.: изд. «Лань», 2008.- 432с.
2. Е.С. Платунов Физика. Т.2. Молекулярная физика и термодинамика: Учебное пособие, 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2005. – 278 с.
3. Ю.И. Тюрин, И.П. Чернов, Ю.Ю. Крючков Физика. Молекулярная физика. Термодинамика.- СПб.: изд. «Лань», 2008.- 228с.

## Лабораторная работа № 6

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ПОТОКА ГАЗА

Цель работы - экспериментальное и теоретическое изучение работы вихревого преобразователя энергии потока.

Понимание физических основ работы преобразователя и знание количественных соотношений определяющих параметров необходимо для прикладного применения преобразователя в безмашинных холодильных и подогревных устройствах.

Основы теории. Сущность эффекта Ранка. Открытый в 1931г. Ж.Ранком (Франция) эффект разделения газового потока в вихре определенной структуры на области с повышенной (по отношению к температуре входа  $T_{вх}$ ) и пониженной температурой используется для безмашинного преобразования энергии (температуры) газового потока [1-2].

Упрощенная схема трубы ("улитки") Ранка (вихревого преобразователя потока) с открытым циклом представлена на рис. 1.

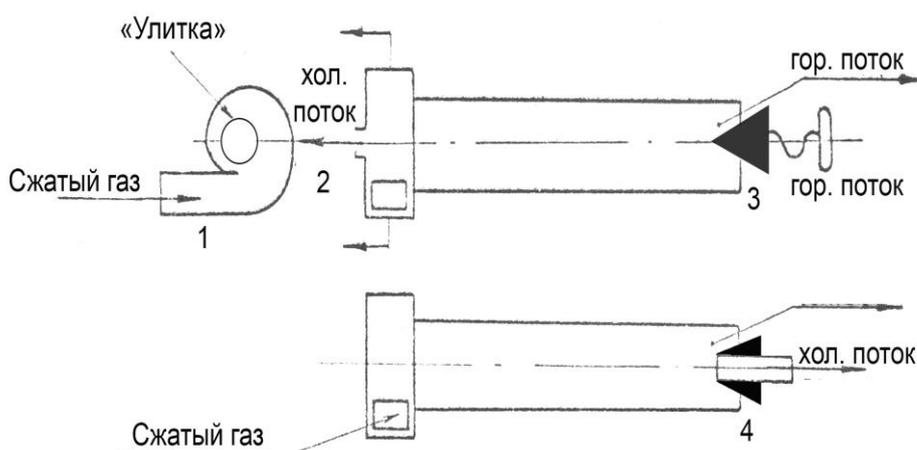


Рис.1

Если в гладкую цилиндрическую полость 1 ввести через тангенциальное сопло 2 поток газа, то исходное прямолинейно-поступательное движение газа преобразуется в спирально-вихревое. Температура и расход охлажденного и подогретого газа регулируются дросселем (3, 4).

Если прохождение газа через устройство происходит достаточно быстро (практически без теплообмена с окружающей средой через стенки устройства), то полная энергия  $E_{полн}$  стационарного (постоянного во

времени) потока газа складывается из его энтальпии  $I$  и кинетической энергии потока  $E_{кин}$ :

$$E_{полн} = I + E_{кин} \quad (1)$$

При отсутствии теплообмена через стенки устройства поток газа можно рассматривать как изоэнтروпийный (энтропия потока  $S = const$ ).

Используем основные термодинамические соотношения для оценки энтальпии потока  $I$  и ее изменения  $dI$  в изоэнтропийном процессе за единицу времени:

$$dI_s = C_p \cdot G \cdot dT, \quad \text{Вт}$$

Если  $C_p(T) = const$ , то

$$I_{вых} = \int dI(T) = C_p \cdot G \cdot T_{вых} + I_0 \quad (2)$$

где  $C_p$  - теплоемкость газа при постоянном давлении;  $G$  - массовый расход газа, кг с<sup>-1</sup>;  $I_0$  - постоянная интегрирования.

Кинетическая энергия потока  $E_{кин}$  на выходе из вихревого преобразователя

$$E = \frac{1}{2} G \cdot (\omega_{пост.осев.}^2 + \omega_{вращ.}^2) \quad (3)$$

Полная удельная (на единицу массы газа) энергия потока в условиях изоэнтропийного течения в устройстве остается неизменной, т.е.

$$U_{вых} = \frac{E_{полн.вых.}}{G} = I_{вых} + \frac{1}{2} (\omega_{пост.осев.}^2 + \omega_{вращ.}^2) \quad (4)$$

Подставив в уравнение (4)  $I_{вых}$  (2) и преобразуя (разделив на  $G$ ), получим

$$U_{вых} = I_{вых} + \frac{1}{2} (\omega_{пост.осев.}^2 + \omega_{вращ.}^2) = C_p T_{вых} + \frac{1}{2} (\omega_{пост.осев.}^2 + \omega_{вращ.}^2) + i_0 \quad (5)$$

Для входного сечения запишем по аналогии с выражением (5)

$$U_{вх} = C_p T_{вх} + \frac{1}{2} \omega_{вх}^2 + i_0 \quad (6)$$

Так как в изоэнтропийном процессе полная  $E_{полн}$  и удельная энергии на входе и выходе неизменны (пренебрегая потерями на трение в газе), то, приравняв правые части уравнения (5) и (6), получим

$$C_p \cdot T_{вх} + \frac{1}{2} \cdot \omega_{вх}^2 = C_p \cdot T_{вых} + (\omega_{пост.осев.}^2 + \omega_{вращ.}^2) \quad (7)$$

Используя известные из гидрогазодинамики выражения для потока

идеальной несжимаемой жидкости, можно получить связь между скоростями  $\omega_{вх}$ ,  $\omega_{вращ}$  и геометрией преобразователя  $r, D$

$$\omega_{вращ} \approx \omega_{вх} \cdot \frac{D}{2r} \quad (8)$$

справедливую для широкого диапазона изменения параметров  $\omega_{вх}$  и  $D/r$  при  $\omega_{вх} < \omega_{звук}$  (рис. 2б).

Далее можно выразить и  $\omega_{пост осев}$  через геометрические параметры вихревой трубы:

$$\omega_{пост.осев.} = \frac{\omega_{вх}}{\pi} \cdot \frac{d_{вх}}{D} \quad (9)$$

Подставляя уравнения (8), (9) в выражение (7) с учетом  $C_p = \text{const}$ , получим

$$T_{вых} - T_{вх} = \frac{\omega_{вх}^2}{c_p} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{D}{2r} \right)^2 - \frac{1}{\pi^2} \left( \frac{d_{вх}}{D} \right)^2 \right] = f(r) \quad (10)$$

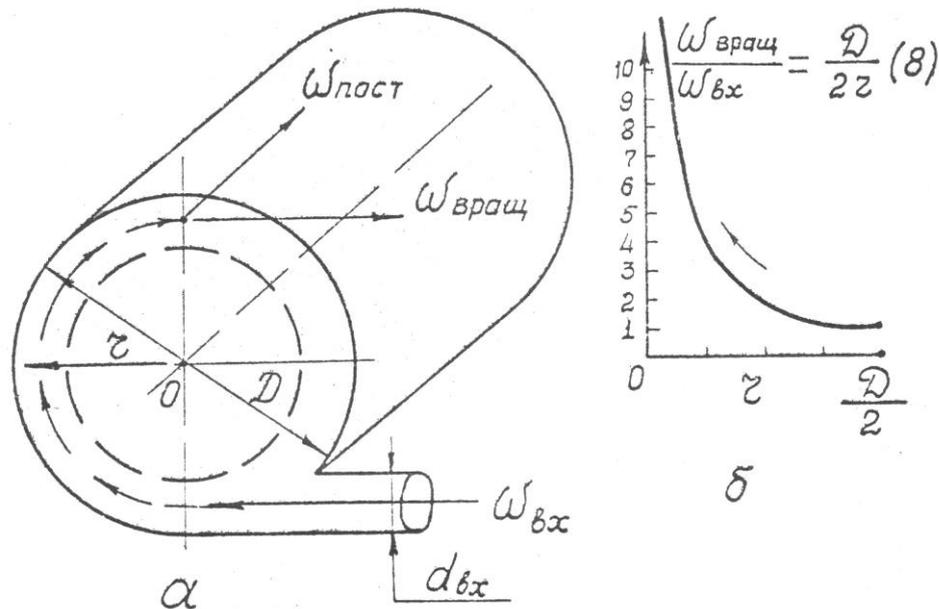


Рис.2 Схема вихревой трубы

Поскольку последнее слагаемое в правой части в фигурных скобках постоянно при выбранных  $\omega_{вх}$ ,  $d_{вх}$ ,  $D$ , то температура газа на выходе  $T(r)$  зависит только от радиуса и может существенно (на десятки градусов) уменьшаться с уменьшением  $r$ .

Реальный процесс разделения газа в вихревом преобразователе значительно сложнее из-за следующих сопутствующих процессов:

1. Частичного нарушения изоэнтропийности процесса (теплообмен через стенки трубы с окружающей средой).
2. Неидеальности газа (потери на трение).
3. Сжимаемости газа под действием инерционных сил на периферии трубки и расширения (снижения плотности) в центральной области.
4. Локальных дроссель-эффектов на входе и выходе и др.

Тем не менее, реальное снижение температуры газа составляет 50÷55% от теоретического (10).

Итак, изменение температуры газового потока в вихревом преобразователе происходит за счет:

- перераспределения энергии газового потока (кинетическая энергия поступательного движения и тепловая энергия потока на входе);
- появления новых степеней свободы (вращательного спирально-вихревого движения);
- перераспределения температуры по радиусу вихря из-за сопутствующих процессов.

Получим основные соотношения, позволяющие увязать расход газа  $G$  и его физические свойства  $C_p$  с холодопроизводительностью  $W_{хол}$  и перепадом температуры между входом и выходом. Обозначим поток газа, отбираемый из холодной (близкой к центру) области через  $G_{хол}$ , а поток газа из периферийной нагретой области через  $G_{гор}$ .

Обозначим безразмерную долю холодного потока

$$\mu = \frac{G_{хол}}{G} \quad (11)$$

Выразим энтальпии охлажденной  $i_{хол}$  и нагретой  $i_{гор}$  долей потока

$$i_{вх} \cdot G = i_{хол} \cdot G_{хол} + i_{гор} \cdot G_{гор} \quad (12)$$

Полная холодопроизводительность вихревой трубы  $W_{хол}$ , Вт

$$W_{хол} = G_{хол} (i_{вх} - i_{хол}) \quad (13)$$

$$W_{хол} = G_{гор} (i_{гор} - i_{вх}) \quad (14)$$

Удельную (на единицу массы газа) холодопроизводительность вихревой трубы получим, разделив  $W_{хол}$  на  $G$ :

$$q_{хол} = \frac{G_{хол}}{G} (i_{вх} - i_{хол}) = \mu (i_{вх} - i_{хол}) \quad (15)$$

или, выражая  $i$  через  $C_p, T_{вх}, T_{вых}$ ,

$$q_{хол} = \mu \cdot c_p \cdot \Delta T_{хол} \quad (16)$$

Отношение  $\xi = \Delta T_{хол} / \Delta T_{хол теорет.}$  называют температурной эффективностью вихревого преобразователя ( $\xi = 0,5 \div 0,55$ ).

Оптимальная доля  $\mu_{опт}$  охлажденного потока составляет  $0,25 < \mu_{опт} < 0,35$ , что снижает потенциальную холодопроизводительность вихревого газоохладителя.

Конструктивная простота и надежность устройства (отсутствие движущихся частей) в ряде случаев становятся определяющими преимуществами вихревой трубы.

Недостаток вихревой трубы - сильный (до 100 дБ.) шум в области высоких частот ( $> 2000$  Гц).

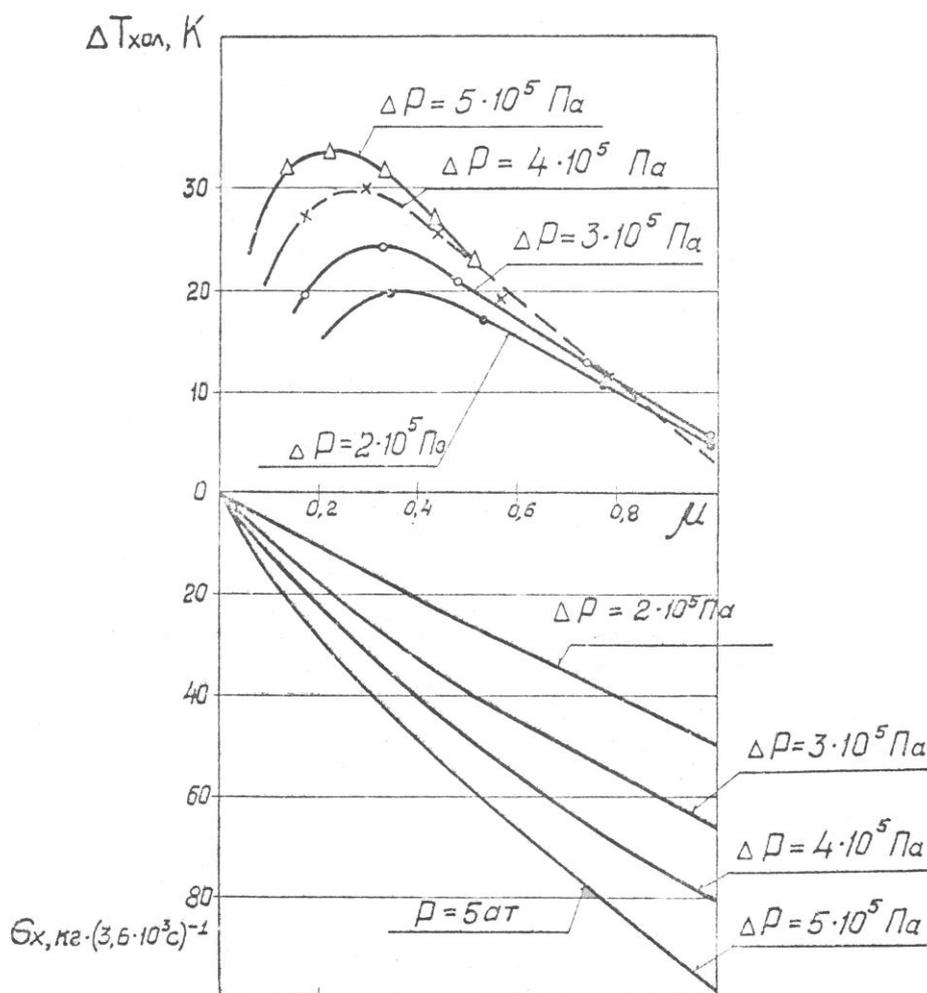


Рис. 3 Характеристики вихревой трубы

На рис. 3 приведены характеристики одной из труб. Как видно из рис. 3, наибольшее изменение температуры (понижение  $\Delta T_{\text{хол}}$ ), наблюдающееся при  $\mu \approx 0,25$ , не совпадает с максимумом холодопроизводительности ( $\mu \cdot \Delta T_{\text{хол}}$ ) что, впрочем, характерно и для других преобразователей тепловой энергии (термоэлектрический преобразователь и др.).

#### Описание экспериментальной установки

Конструкция вихревого газоохладителя изображена на рис. 4 [3]. Он состоит из корпуса 1, изготовленного из оргстекла с тангенциальным вводом 2 газа от баллона или компрессора.

Выход горячего газа на лицевую сторону экспериментальной установки

с дроссельным колпачком (отверстие переменного сечения со шкалой в 10 делений).

Выход холодного потока с тыльной стороны установки 3.

Перепады температур в горячем  $\Delta T_{гор}$  в холодном  $\Delta T_{хол}$  потоках измеряются дифференциальными термопарами (материал электродов указывает преподаватель). Дифференциальные термопары подключены через переключатель П к гальванометру или цифровому измерительному прибору.

При выполнении работы исследуют:

1. Величину  $\mu$ , оцениваемую не из ее определения  $\mu = \frac{G_{хол}}{G}$ , а из выражений (12)-(16):

$$\mu = \frac{T_{гор} - T_{ex}}{T_{гор} - T_{хол}} \quad (17)$$

при различных размерах выходной щели-дросселя (деления от 0 до 10 с шагом 1).

2. Зависимость  $\Delta T_{хол} = f(\mu)$ ,  $\Delta T_{хол.теор.} = T_{ex} \left[ 1 - \left( \frac{p_{ex}}{p_{вых}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$ ,

где  $p_{вх}, p_{вых}$  – давление на входе и выходе вихревого преобразователя;  $k$  - показатель адиабаты,  $1,4 < k < 1,67$ .

Значение  $c_{p-возд.} = 1300 \frac{Дж}{кг \cdot К}$ ,  $k_{возд.} = 1,4$ .

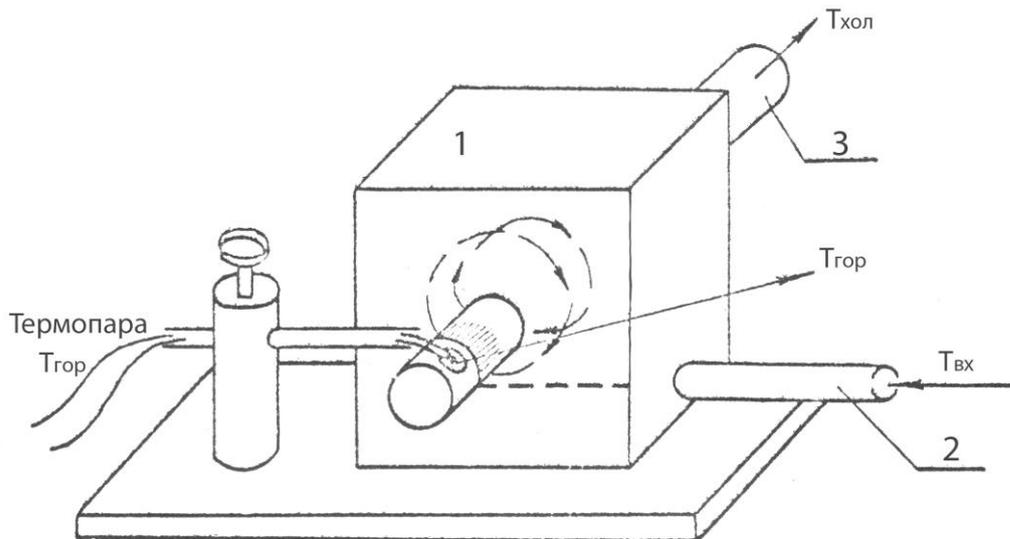


Рис. 4 Схема экспериментальной установки

## Порядок выполнения работы

Ознакомившись с описанием работы и получив разрешение преподавателя, студент должен:

1. Записать наименования, марки и номера измерительных приборов, их класс точности и диапазоны измерений. Подключить к сети 220В измерительный прибор (гальванометр или цифровой вольтметр).

2. Установить "ноль" гальванометра, произвести калибровку или настройку цифрового вольтметра. С этой целью: отпустить арретир гальванометра (в нижнем правом углу лицевой панели прибора) поворотом указателя часовой стрелки до упора. На пульте управления переключатель термопар ставится в положение "Контроль". Световой индикатор ("зайчик") гальванометра должен стоять в середине шкалы на отметке "ноль". Если световой индикатор смещен, его положение корректируется отверткой - повернуть винт корректора (на правой стороне гальванометра).

Настройка цифрового прибора проводится по инструкции (паспорт прибора).

3. Включив компрессор или открыв вентиль баллона сжатого газа, подать газ на вход вихревого преобразователя и установить заданный преподавателем расход газа  $G$ ,  $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$ .

4. Открыть дроссель на горячем потоке максимально и (через минуту, полторы) измерить показания

$$T_{\text{вх}}, \Delta T_{\text{хол}}, \Delta T_{\text{гор}} = \alpha \cdot \Delta E_i$$

где  $\Delta E_i$  – термоЭДС при измерении  $T_{\text{вх}}, \Delta T_i$ ;

Для дифференциальных термопар

медь-константан  $\alpha = 2,5 \cdot 10^{-2}$ ,  $\frac{\text{К}}{\text{мкВ}}$ ,

хромель-алюмель  $\alpha = 2,46 \cdot 10^{-2}$ ,  $\frac{\text{К}}{\text{мкВ}}$ ,

хромель-копель  $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-2}$ ,  $\frac{\text{К}}{\text{мкВ}}$

5. Провести аналогичные измерения при частично перекрытом отверстии дросселя на делениях шкалы колпачка  $N_k = 1,2,3,4,5,6,8,10$ .

6. Провести три серии независимых измерений, показать преподавателю результаты измерений и подписать их.

7. Оценить погрешность измерений (спросить у преподавателя, для каких значений  $\mu$  провести оценки).

## Оформление отчета

В отчете представить:

1. Основные расчетные формулы.

2. Результаты измерений:  $P_{\text{вх}}, T_{\text{вх}}, N_k$  - деления дросселя;  $P_{\text{Г хол, гор}}, \Delta T_{\text{хол, гор}}, T_{\text{хол, гор}}, M(N_k); W_{\text{хол}}(M); M \cdot \Delta T_{\text{хол}}(M); \xi$ .

На одном из делений шкалы колпачка  $N_k$  по указанию преподавателя провести большее число измерений  $N_{\text{изм}}$  для более точной оценки погрешности измерений.

### Контрольные вопросы

1. Каково распределение скоростей потока по радиусу вихря  $\omega(r)$ ?
2. Зависит ли от радиуса давление в вихре и почему? Если зависит, то как (изобразить зависимость  $p(r)$ ).
3. Почему происходит изменение температуры газового потока?
4. От каких параметров и как (качественно) зависит понижение температуры газового потока? Изобразить график.
5. Совпадают ли условия максимального охлаждения и максимальной холодопроизводительности?
6. Размерность основных исходных параметров и характеристик преобразователя.
7. Каковы основные типы конструкции вихревого преобразователя? Конструкция исследуемого макета.
8. Изобразить схему измерения температуры входа  $T_{\text{вх}}$ ; и перепадов  $\Delta T_i$ . Прямые измерения или косвенные?
9. Чем измеряют  $T_{\text{вх}}$ ,  $\Delta T_i$  и какова инструментальная погрешность единичного измерения?
10. Как изменится погрешность измерения (или ее составляющие) с увеличением числа  $N$  измерений до 10?
11. Как изменится температура  $T_{\text{хол, гор}}$ , если стенки устройства (улитки) не будут адиабатическими?
12. Как изменится график  $T(r)$  из-за изменения давления  $p(r)$ ? Почему?
13. Как изменится вид графика  $T(r)$ , если учесть трение в реальном газе и неполную адиабатичность стенок?

### Литература

1. Е.С. Платунов Физика. Т.2. Молекулярная физика и термодинамика: Учебное пособие, 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2005. – 278 с.
2. Ю.И. Тюрин, И.П. Чернов, Ю.Ю. Крючков Физика. Молекулярная физика. Термодинамика.- СПб.: изд. «Лань», 2008.- 228с.
3. Архаров К.Л., Марфенина М.Д., Микулин Г.Т. Теория и расчет криогенных систем. — М.: Машиностроение, 1978, с.142-146.

## Лабораторная работа № 7

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ (ТЭП) В РЕЖИМЕ ТЕПЛОВОГО НАСОСА

Цель работы — экспериментальное и теоретическое изучение работы термоэлектрического преобразователя в различных режимах:

- теплового насоса для охлаждения рабочего вещества (твердого тела - на установке 1; жидкости или газа - на установке 2);
- теплового насоса в отопительном цикле ("перекачки" теплоты от холодного к более нагретому веществу);
- в режиме термоэлектрического генератора электроэнергии.

Знание физических основ работы термоэлектрического преобразователя и методов количественной оценки его параметров необходимо для проектирования и эксплуатации различных промышленных термоэлектрических устройств охлаждения, нагрева или систем термостатирования.

1. Основы теории. Физической основой работы термоэлектрических преобразователей служат следующие экспериментально установленные эффекты.

Эффект Зеебека. Если концы (спаи) разомкнутой цепи (рис.1, поз. 3, 3'), составленной из разнородных проводников (1, 2) находятся при различной температуре, то в цепи появляется электродвижущая сила – термоЭДС  $dE$ :

$$dE = \alpha \cdot dT, \quad \text{В} \quad (1)$$

где  $\alpha$  - коэффициент термоЭДС, зависящий от материала электродов, образующих цепь. Значения  $\alpha$  различных материалов см. в [1].

Эффект Пельтье. Если по той же цепи пропускать ток  $I$  от источника 4, то на границе разнородных электродов (на спае) выделяется (горячий спай) или поглощается (холодный спай) тепловая энергия (теплота Пельтье) с мощностью

$$dW_{\Pi} = \Pi \cdot dI, \quad \text{Вт} \quad (2)$$

где  $\Pi$  — коэффициент Пельтье, связанный с коэффициентом термоЭДС спая  $\alpha$  зависимостью

$$\Pi = \alpha \cdot T, \quad \text{В} \quad (3)$$

Эффект Томсона. Если в той же цепи существует градиент температуры ( $dT/dx$ ), то при прохождении тока  $I$  на спаях выделяется (или поглощается) тепловая энергия (теплота Томсона) с мощностью

$$dW_T = \tau_T \cdot dI \cdot \frac{dT}{dx} \cdot dx, \quad \text{Вт} \quad (4)$$

где  $\tau_T$  - коэффициент Томсона, связанный с коэффициентом термоЭДС соотношением

$$\tau_T = \bar{T} \cdot \frac{d\alpha}{dT}, \quad \text{В/К} \quad (5)$$

где  $\bar{T}$  - среднее значение температуры на спае.

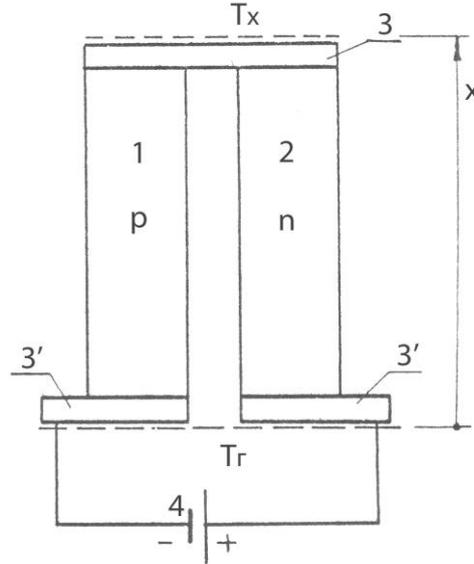


Рис.1 Термоэлектрический преобразователь

**Эффект Джоуля.** При пропускании тока по цепи происходит выделение теплоты Джоуля, мощность которой

$$W_D = I^2 \cdot R_{ц}, \quad (6)$$

где  $R_{ц}$  - полное сопротивление цепи.

Если реальный термоэлектрический преобразователь (термоэлемент рис. 1) работает в узком диапазоне изменения температуры (несколько Кельвинов или десятки Кельвинов), то можно считать, что  $\alpha \neq f(T)$ , тогда

$$\tau_T = \bar{T} \cdot \frac{d\alpha}{dT} \cong 0$$

и эффектом (теплотой) Томсона можно пренебречь.

Можно также показать, что независимо от наличия перепада температур на спаях теплота Джоуля будет выделяться примерно поровну (пополам) на горячих и холодных спаях.

Обычно несколько термоэлементов, установленных параллельно, образуют термобатарею.

В установившемся режиме уравнение баланса тепловой энергии (закон сохранения) для холодных спаев термопреобразователя (термобатареи) в целом можно записать в виде

$$W_x = W_{II} - 0,5 \cdot W_I - q_\lambda \quad (7)$$

$$W_x = \Pi_x \cdot I - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R_{ц} - \sigma_{ТБ} (T_{Г} - T_{Х}) \quad (8)$$

где  $q_\lambda = \sigma_{ТБ} (\bar{T}_Г - \bar{T}_Х)$  - тепловой поток за счет теплопроводности  $\lambda_{ТБ}$  от

горячих спаев к холодным (вредный приток тепла,, уменьшающий эффективность охлаждения на холодных спаях);  $\sigma_{TB}$ - полная тепловая проводимость термобатареи, Вт/К ;  $S$  - площадь батареи. Из уравнения (6) можно оценить и максимально достижимый перепад температур между холодным и горячим спаями термобатареи (соответствующий идеальной теплоизоляции  $W_x=0$ , т.е. без перекачки теплоты)

$$\Delta T_{МАКС} = \frac{1}{\sigma_{TB}} \left[ \Pi_x \cdot I^* - \frac{1}{2} (I^*)^2 \cdot R_{Ц} \right] \quad (9)$$

Соответствующее значение тока  $I^*$  можно оценить, приравняв нулю  $(\partial \Delta T / \partial I)$  производную

$$(\partial \Delta T / \partial I) = \frac{1}{\sigma_{TB}} \left( \Pi_x - \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot I^* \cdot R_{Ц} \right) = 0$$

Откуда

$$I^* = \frac{\Pi_x}{R_{Ц}} \quad (10)$$

Подставляя выражение (10) в уравнение (9), получим

$$\Delta T_{МАКС} = \frac{R_{Ц}}{2\sigma_{TB}} (I^*)^2, \quad R_{Ц} \cong R_{TB} \quad (11)$$

Если в выражение (11) вместо  $I^*$  подставить уравнение (10), получим

$$\Delta T_{МАКС} = \frac{1}{2\sigma_{TB}} \cdot \frac{\Pi_x^2}{R_{Ц}}$$

и, заменяя  $\Pi_x = \alpha T_x$ , имеем

$$\Delta T_{МАКС} = \frac{\alpha^2}{2\sigma_{TB} \cdot R_{Ц}} \cdot T_x^2 \quad (12)$$

Если длины и поперечные сечения каждого электрода одинаковы, то комплекс  $\alpha^2 / (2\sigma_{TB} \cdot R_{Ц})$  не зависит от геометрии батареи, определяется только материалом электродов и называется эффективностью термобатареи:

$$Z = \frac{\alpha^2}{\sigma_{TB} \cdot R_{TB}} = \frac{\alpha^2}{\lambda \cdot \rho} \quad (13)$$

Значения  $Z$  различных материалов приведены в приложении [1]. При использовании термоэлектрического преобразователя в качестве охлаждающего устройства важной его характеристикой является холодильный коэффициент

$$E = \frac{W_x}{W_{эл}}, \quad (14)$$

где  $W_{эл}$  - мощность (электрическая) системы питания, затрачиваемая на джоулевы потери  $W_{\Delta} = I^2 R_{Ц}$  и на преодоление термоЭДС  $W_{\alpha}$  :

$$\begin{aligned} W_{\alpha} &= E_{\alpha} \cdot I = \alpha \cdot (T_G - T_X) \cdot I \\ W_{эл} &= \alpha_{TB} \cdot (T_G - T_X) \cdot I + \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R_{Ц} \end{aligned} \quad (15)$$

Подставляя в выражение (14) величину  $W_{эл}$ , (15) и  $W_x$  (8), получим

$$\varepsilon = \left[ P_x \cdot I - \frac{1}{2} I^2 \cdot R_{\text{Ц}} - \sigma_{\text{ТБ}} (T_{\text{Г}} - T_{\text{Х}}) \right] / [\alpha \cdot (T_{\text{Г}} - T_{\text{Х}})] \quad (16)$$

Дифференцируя  $\varepsilon$  по  $I$  и приравнивая нулю, можно найти величину тока  $I^{**}$  для  $\varepsilon_{\text{МАКС}}$ :

$$I^{**} = \frac{\alpha}{M \cdot R_{\text{Ц}}} (T_{\text{Г}} - T_{\text{Х}}); \quad M = \sqrt{1 + \frac{Z}{2} (T_{\text{Г}} - T_{\text{Х}})} \quad (17)$$

и, подставляя в уравнение (16), получить

$$\varepsilon_{\text{МАКС}} = \frac{T_{\text{Х}}}{T_{\text{Г}} - T_{\text{Х}}} \cdot \frac{M - T_{\text{Г}}/T_{\text{Х}}}{M} \quad (18)$$

При возрастания  $Z$  растет  $M$ , второй сомножитель в выражении (18) стремится к 1, а  $\varepsilon_{\text{МАКС}}$  к своему пределу  $\varepsilon_{\text{МАКС МАКС}}$

$$\varepsilon_{\text{МАКС МАКС}} = \frac{T_{\text{Х}}}{T_{\text{Г}} - T_{\text{Х}}} \quad (19)$$

т.е. к величине холодильного коэффициента идеальной холодильной машины в цикле Карно.

Рассмотрим режим максимальной холодопроизводительности (8), приняв

$$\partial W_x / \partial I = 0 \quad (20)$$

В этом случае (сравнить с (10))  $I^{***} = \frac{\alpha \cdot T_{\text{Х}}}{R_{\text{Ц}}} = I^*$

т.е. ток  $I$  один и тот же для максимального охлаждения холодного спая и максимальной холодопроизводительности.

Холодильный коэффициент

$$\varepsilon(W_{x \text{ МАКС}}) = \frac{1}{2T_{\text{Г}}} [T_{\text{Х}} - 2(T_{\text{Г}} - T_{\text{Х}})/(Z \cdot T_{\text{Х}})] \quad (21)$$

Сравнивая выражения (21) и (18), можно видеть, что  $\varepsilon(W_{x \text{ МАКС}}) < \varepsilon_{\text{МАКС}}$ .

#### Описание лабораторной установки

Устройство установки и измерительная схема изображены на рис. 2. Многоспайная ( $N = 18$ ) полупроводниковая термобатарея 1 дискового типа, рассчитанная на токи  $I \leq 20$  А, подключена к блоку питания 2.

Горячими спаями  $T_{\text{Г}}$  батарея крепится к массивному алюминиевому блоку (термостату) 3, который при длительных или многократных измерениях принудительно термостатируется проточной жидкостью от термостата 4 при комнатной температуре.

На холодные спай  $T_{\text{Х}}$  устанавливается медный цилиндр 5 с массой  $M$  и удельной теплоемкостью  $C_{\text{сн}} = 390$  Дж · кг<sup>-1</sup>К<sup>-1</sup>. В отверстие цилиндра устанавливается термопара 6 для измерения скорости его охлаждения ( $\theta = \frac{\partial T}{\partial \tau}$ ) с помощью измерительного прибора 7 или самописца 8

$$\theta = \frac{\Delta T}{\Delta \tau} = \alpha \cdot \frac{E(\tau_1) - E(\tau_2)}{\tau_2 - \tau_1} \quad (22)$$

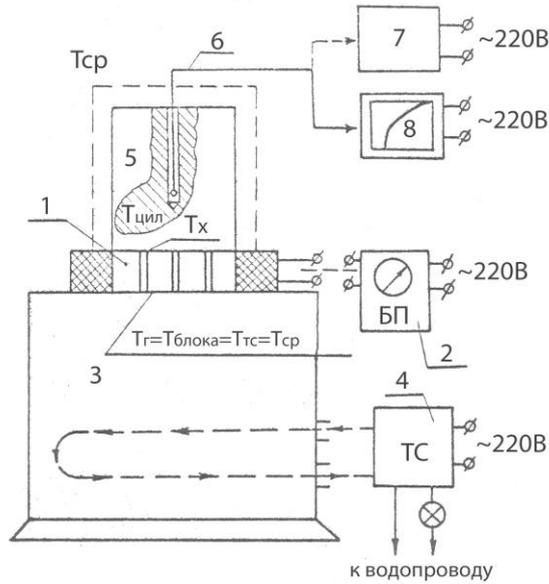


Рис.2 Экспериментальная установка

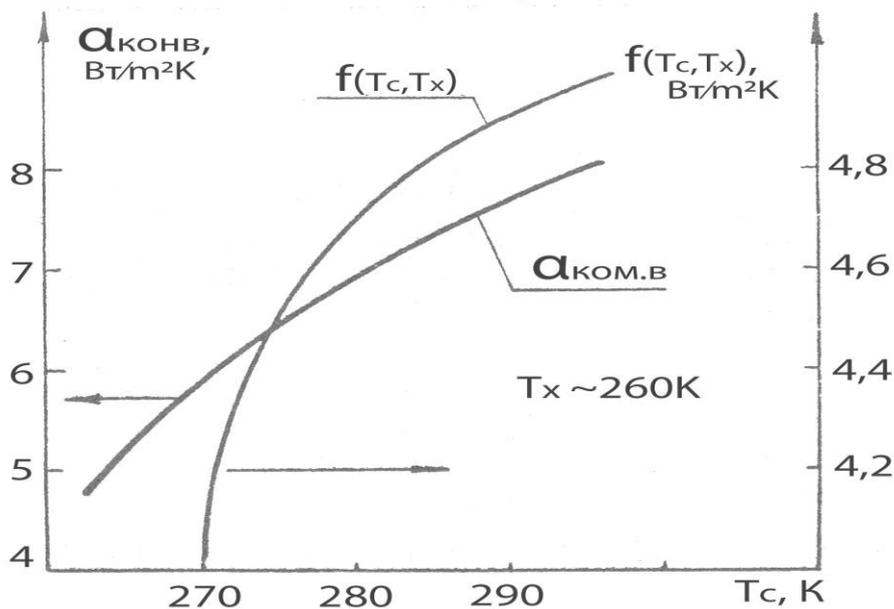
где  $\alpha$ ,  $\text{K} \cdot \text{mV}^{-1}$  - коэффициент термоЭДС термопары. Для термопар медь-константан

$$\alpha = 24,4, \text{K} \cdot \text{mV}^{-1}, \tau_i - \text{время.}$$

Уравнение теплового баланса охлаждаемого цилиндра (индекс «ц»)

$$W_x(\tau) = C_{\Sigma} \cdot \vartheta(\tau) + \sigma_{\text{заз}} (T_{\text{ср}} - T_{\text{ц}}(\tau)) \quad (23)$$

где  $C_E = C_{\text{си}} \cdot M_{\text{ц}}$  - полная теплоемкость образца,  $\text{Дж} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $\sigma_{\text{заз}}$  - тепловая проводимость между окружающей средой (воздух) и охлаждаемым цилиндром,  $\text{Вт} \cdot \text{K}^{-1}$ . График  $\sigma_{\text{заз}} = f(T_{\text{ц}})$  представлен на рис. 3.

Рис. 3 Зависимость  $\sigma_{\text{заз}} = f(T_{\text{ц}})$

Если изменение температуры цилиндра записывается на диаграммную ленту, то измерение скорости охлаждения "в" проводится следующим образом:

$$v \approx \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{j+1} - x_j}$$

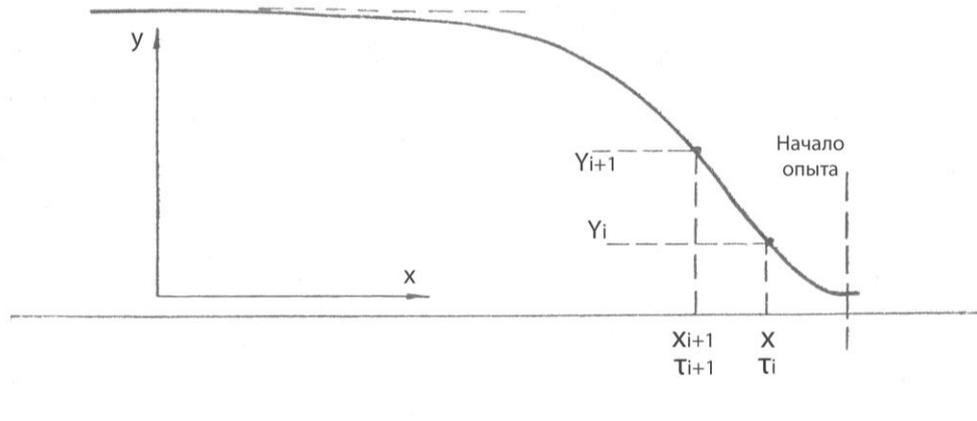


Рис. 4

где параметры  $y_i, x_j$  (рис) связаны с искомым параметром «б»

$$\tau_2 - \tau_1 = (x_{j+1} - x_j) \cdot \omega,$$

где  $\omega$  – скорость движения ленты,  $x_j$  – расстояние, мм,  $\omega = 0,2 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$  (для каждого прибора уточнить у лаборанта)

$$T(\tau_{i+1}) - T(\tau_i) = (y_{i+1} - y_i) \cdot K_y \cdot \alpha_T$$

где  $K_y$  – масштабный коэффициент оси  $y$ ;  $K_y = 6,65 \text{ мВ} \cdot \text{мм}^{-1}$  (узнать у лаборанта).

#### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с конструкцией установки 1 и схемой измерения.
2. Записать наименования, марки и номера измерительных приборов, их класс точности и диапазон, в котором проводится измерение.
3. Получив разрешение преподавателя, включить измерительную аппаратуру и, если задано, термостатирующую жидкостную систему.
4. Установить заданную преподавателем величину тока питания  $I$  и фиксировать изменения температуры охлаждаемого объекта во времени или на диаграмму самописца.
5. Провести аналогичные измерения для заданных значений тока питания термоэлектрического преобразователя.
6. Сообщить преподавателю о завершении программы эксперимента и отключить питание термобатареи, измерительную аппаратуру и термостат.

#### Обработка результатов

В начальный момент включения термобатареи (1-2 мин) или, если блок 3 термостатирован, выполняются следующие условия:

$$T_{\Gamma} = T_{X \text{ нач}} = T_{Ц \text{ нач}} = T_{\text{ср}}$$

В этих условиях переток теплоты от горячих спаев к холодным

$$q_{\lambda} = \sigma_{ТБ} (T_{Г} - T_{Х})_{\tau=0} = 0$$

теплоприток к охлаждаемому цилиндру от окружающей среды

$$q_{cp} = \sigma_{343} (T_{cp} - T_{Ц})_{\tau=0} = 0$$

и из уравнений (8) и (23) можно найти

$$\alpha \approx \frac{1}{T_{cp} \cdot I} \left( C_{\Sigma} \cdot \vartheta + \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R_{Ц} \right) \quad (24)$$

На конечном участке опыта при максимальном перепаде температур  $T_{cp} - T_{Ц\text{кон}}$ , подставив найденные ранее  $\alpha$  и  $W_x = \sigma_{ТБ} (T_{cp} - T_{Ц\text{кон}})$  в выражение (8), оценим

$$\sigma = \left[ \alpha \cdot T_{Ц\text{кон}} \cdot I - \frac{1}{2} I^2 \cdot R - \sigma_{343} (T_{cp} - T_{Ц}) \right] / (T_{Б1} - T_{Ц\text{кон}}) \quad (25)$$

приняв приближенно, что  $T_{Г} \simeq T_{Б1}$ ,  $T_{Х} = T_{Ц\text{кон}}$ .

### Оформление отчета

1. Представить таблицы  $E(\tau)$  и диаграммную ленту.
2. Представить значения холодопроизводительности  $W_x(\tau)$  для нескольких значений времени (6-7 точек), значения  $\alpha$  (24),  $\sigma_{ТБ}$  (25),  $Z$  (13),  $E$ ,  $T_{Х\text{мин}}$  (9).

Напомним, что  $R_{ТБ}$  изучаемой термобатареи равно  $R_{ТБ} = 0,235$  Ом.

3. Оценить относительную погрешность единичного измерения  $\Delta W_x / W_x$ .

### Контрольные вопросы

1. Из каких основных элементов собрана лабораторная установка 1?
2. В чем заключается принцип работы термоэлектрического преобразователя в режиме теплового насоса охлаждения?
3. Какими аналитическими соотношениями описывается поглощение тепла на холодных спаях и выделение его на горячих?
4. Каково качественное влияние определяющих параметров, входящих в формулы на исследуемые характеристики термобатареи?
5. Какова размерность параметров?
6. Как измеряется температура в опыте? Прямые это или косвенные измерения?
7. Как оценить погрешность единичного измерения, серии измерений?

### Литература

1. Е.С. Платунов Физика. Т.2. Молекулярная физика и термодинамика: Учебное пособие, 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2005.

## Лабораторная работа № 8

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В ОТОПИТЕЛЬНОМ ЦИКЛЕ

1. Основы теории. См. описание предыдущей работы № 7.

#### Описание лабораторной установки

Схематическое изображение лабораторной установки 2 показано на рис. 1. Основу установки представляет многоспайная термобатарея 1 с каналами 2, 3 для подвода и отвода жидкости (воды от сети водопровода или от термостата).

На входе и выходе жидкости из каналов установлены термопары 4, 5, 6, 7 для измерения температуры  $T_{вх}$  жидкости на входе в канал и разности температур  $\Delta T$  входа и выхода в результате нагрева или охлаждения жидкости в канале.

Все термопары выведены на блок холодных спаев БХС 8, обеспечивающий стабилизацию и равенство температур электродов термопар. Переключателем 9 термопары могут быть подключены непосредственно или как дифференциальная термопара к прибору 10 для измерения термоЭДС термопар. Ввиду малых уровней ЭДС термопар (от микровольтов до милливольт) измерение ЭДС производится гальванометрами типа М I95/1 (чаще для дифференциальных термопар), цифровыми приборами микровольтового диапазона либо потенциометрами типа ПП-63.

Термобатарея установлена в корпусе 1 лабораторной установки и закреплена к основанию корпуса (рис. 2). Передняя панель 2 корпуса может быть открыта (вперед) для доступа к термобатарее и термопарам. На откидной панели также смонтированы блок холодных спаев БХС 3, переключатель термопар 4 и клеммы 5 для подключения термопар к прибору для измерения их ЭДС.

На неподвижной части передней панели установлены поплавковые расходомеры 6 РМ (РС) для измерения расходов жидкости в каналах термобатареи (холодного  $G_x$  и горячего  $G_r$  потока).

На заднюю стенку корпуса выведены шланги и патрубки подачи и отвода жидкости и клеммы питания термобатареи.

Для исследования работы термобатареи в режиме теплового насоса (как в холодильном, так и в отопительном циклах) к клеммам термобатареи подключается источник питания 2 (см. рис. 1) постоянного тока - выпрямитель. Рабочее напряжение измеряется вольтметром 12, а ток амперметром 13.

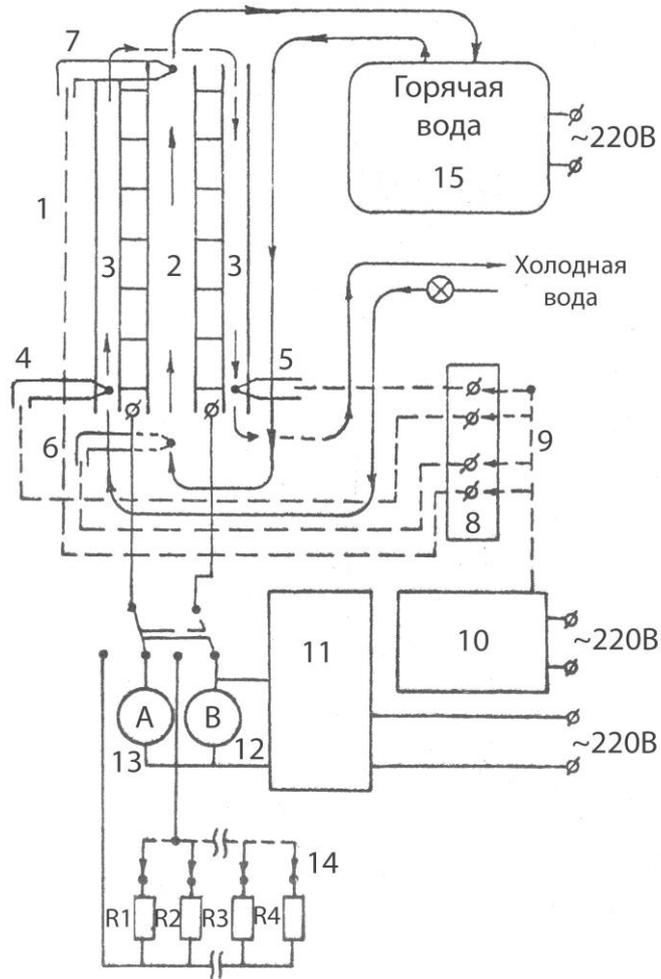


Рис. 1. Схема лабораторной установки

Для изучения работы термобатареи в режиме электрического генератора в каналы подается нагретая вода  $T_T$  от термостата 15 и холодная - от водопроводной сети, а к клеммам батареи подключается дискретный набор сопротивлений внешней нагрузки  $R_H$  (14) или регулируемое сопротивление (реостат).

#### Исследование работы термоэлектрического преобразователя энергии в отопительном цикле

В этом режиме за счет затрат энергии от источника питания термобатарея позволяет обеспечить передачу тепла от менее нагретых тел  $T_X$  к более нагретым  $T_T$  за счет эффекта Пельтье. При этом на холодном спае поглощается тепловая энергия с мощностью,

$$W_{II} = \alpha \cdot T_X \cdot I \quad , \quad \text{Вт} \quad , \quad (1)$$

которая частично компенсируется (уменьшается) теплопритоком  $q_\lambda$  через

вещество электродов термобатареи

$$q_{\lambda} = \sigma_{ТБ}(T_{Г} - T_{Х}) \quad , \quad \text{Вт} \quad (2)$$

Кроме того, на холодном спае выделяется еще и половина Джоулевых потерь за счет внутреннего сопротивления термобатареи:

$$\frac{1}{2}W_{Д} = \frac{1}{2}I^2 \cdot R \quad (3)$$

В результате действия перечисленных факторов от холодных спаев может быть отведено количество тепловой энергии потока

$$W_{Х} = I \cdot \alpha \cdot T_{Х} - \sigma_{ТБ}(T_{Г} - T_{Х}) - \frac{1}{2}I^2 \cdot R \quad , \quad \text{Вт} \quad (4)$$

Как видно из уравнения (4), термобатарея может работать в отопительном цикле лишь при условии, что теплота (мощность) Пельтье превышает кондуктивный теплоприток и половину Джоулевых потерь.

На горячем спае термобатареи в результате действия тех же факторов будет выделяться тепловая энергия мощностью

$$W_{Г} = \alpha \cdot T_{Г} \cdot I + \frac{1}{2}I^2 \cdot R - \sigma_{ТБ}(T_{Г} - T_{Х}) \quad , \quad \text{Вт} \quad (5)$$

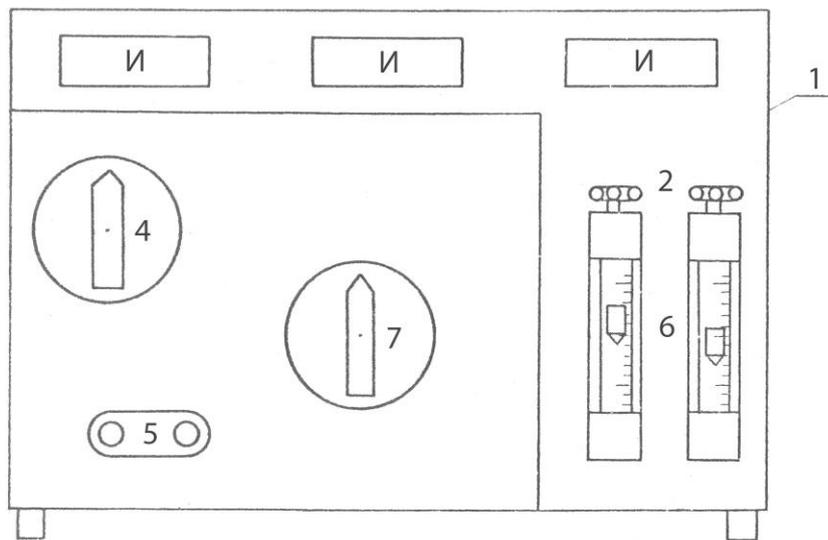


Рис.2

Характеристиками рассматриваемого процесса являются: холодопроизводительность  $W_{Х}$ ; теплопроизводительность  $W_{Г}$ ; холодильный коэффициент  $E = W_{Х}/W_{эл}$  отопительный коэффициент  $\mu_{отоп} = W_{Г}/W_{эл}$ .

#### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с конструкцией установки и схемой измерения .
2. Записать наименования, марки и номера измерительных приборов, их класс точности и диапазон, в котором проводятся измерения.

3. Получив разрешение преподавателя, включить измерительную аппаратуру и подачу жидкости в каналы термобатареи (от водопроводной сети). Установить заданный расход жидкости кранами расходомеров. В случае необходимости включить термостат, установить заданный преподавателем уровень температуры и подать нагретую жидкость на термобатарею.

4. Включить в сеть блок питания (выпрямитель) и установить заданные значения тока  $I$  питания термобатареи.

5. Дождавшись установления стационарного режима (ориентировочное время узнать у преподавателя), измерить изменения температуры на входе и выходе по каналам нагретой  $T_{\Gamma}$  и холодной  $T_{\text{X}}$  жидкости

$$\Delta T_{\text{X}} = T_{\text{X ВХ}} - T_{\text{X ВЫХ}}, \quad \Delta T_{\Gamma} = T_{\Gamma \text{ ВХ}} - T_{\Gamma \text{ ВЫХ}},$$

и величину расхода холодной  $G_{\text{X}}$   $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$  и нагретой  $G_{\Gamma}$  жидкости (градуировки расходомеров хранятся у преподавателя (лаборанта).

Провести аналогичные измерения для других заданных значений тока питания  $I$ .

6. Сообщить преподавателю о завершении программы эксперимента и отключить питание термобатареи, подачу воды, питание измерительной аппаратуры. Показать преподавателю результаты измерений и подписать их.

#### Обработка результатов измерений и оформление отчета

1. Воспользовавшись справочными данными (см. приложение) по теплоемкости воды при измеренных температурах  $T_{\Gamma}$ ,  $T_{\text{X}}$ , вычислить

$$W_{\text{X}} = c_p(T_{\text{X}}) \cdot G_{\text{X}} \cdot \Delta T_{\text{X}} \quad (8)$$

$$W_{\Gamma} = c_p(T_{\Gamma}) \cdot G_{\Gamma} \cdot \Delta T_{\Gamma} \quad (9)$$

при различных значениях  $I$  и, сопоставив с аналогичными величинами, найденными из выражений (4), (5), оценить расхождение между ними.

2. Оценить погрешность единичного определения  $\Delta W_{\text{X},\Gamma} / W_{\text{X},\Gamma}$  по формулам (4), (5) и (8), (9).

3. Рассчитать величину холодильного  $E$  (6) и отопительного  $\mu_{\text{отоп}}$  (7) коэффициентов. Построить графики:  $W_{\text{X}}$  (4), (8);  $W_{\Gamma}$  (5), (9);  $E, \mu_{\text{отоп}}$  - как функции тока питания  $I$ .

#### Контрольные вопросы

1. Из каких основных узлов состоит лабораторная установка?  
2. В каких случаях термобатарея может работать в отопительном цикле?

3. Какими выражениями описывается выделение тепла на горячих спаях и поглощение на холодных спаях термобатареи?

4. Какова размерность параметров, входящих в расчетные формулы?  
Каково их качественное влияние на исследуемые характеристики термобатареи?

5. Как измеряют температуры и перепады температур в работе? Прямые это измерения или косвенные?

6. Как изменится погрешность измерения исследуемых характеристик с увеличением числа измерений?

#### Литература

1. А.И. Ансельм Основы статистической физики и термодинамики. - СПб.: изд. «Лань», 2007.- 448с.
2. Е.С. Платунов Физика. Т.2. Молекулярная физика и термодинамика: Учебное пособие, 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2005. – 278 с.
3. Н.Б. Варгафтик Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: изд. «Наука», 1972.- 720 с.

## Лабораторная работа № 9

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В РЕЖИМЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

Основы теории. Если в каналы термобатареи (см. рис. 1 в работе №8) подать жидкость различной температуры, то на клеммах батареи (при разорванной внешней цепи) появится ЭДС холостого хода  $E_{\text{хх}} = f(\Delta T)$   
 $\Delta T = T_r - T_x$ .

Если к клеммам батареи подключить внешнюю нагрузку  $R_H$ , то в цепи будет протекать ток

$$I = \frac{E}{R_{\text{ТБ}} - R_H} = \frac{\alpha \cdot \Delta T}{(m+1) \cdot R_{\text{ТБ}}}, \quad m = \frac{R_H}{R_{\text{ТБ}}} \quad (1)$$

Полезная мощность  $W_{\text{эл}}$ , выделяющаяся на нагрузке,

$$W_{\text{эл}} = I^2 \cdot R_H = \frac{\alpha^2 \cdot (\Delta T)^2}{R_{\text{ТБ}}} \cdot \frac{m}{(m+1)^2} \quad (2)$$

Коэффициент полезного действия КПД термобатареи  $\eta$  оценивается как отношение полезной мощности  $W_{\text{эл}}$  к тепловой энергии, подведенной к батарее (к горячим слям)

$$\eta = \frac{W_{\text{эл}}}{Q_r} = \frac{T_r - T_x}{T_r} \cdot \frac{m}{m+1} \cdot \left( 1 + \frac{\lambda \cdot \rho}{\alpha^2} \cdot \frac{m+1}{m} - \frac{1}{2} \cdot \frac{T_r - T_x}{T} \cdot \frac{1}{m+1} \right)^{-1} \quad (3)$$

где  $\lambda, \rho$  - теплопроводность и удельное электросопротивление материала электродов термобатареи;  $Z = \left( \frac{\alpha^2}{\lambda \cdot \rho} \right)$  - параметр термоэлектрической эффективности.

Каждая термобатарея проектируется таким образом, чтобы обеспечить или приблизиться (насколько возможно по конструктивным и технологическим ограничениям) к оптимальному соотношению геометрических  $S_i, l_i$  и физических параметров  $\lambda_i, \rho_i$ .

$$\frac{S_1}{S_2} = \sqrt{\frac{\rho_1 \cdot \lambda_1}{\rho_2 \cdot \lambda_2}},$$

где  $S_i$  - поперечное сечение ветвей термоэлемента.

Как и другие генераторы, термобатарея вырабатывает максимальную мощность при  $m = 1$ , т.е.  $R_{\text{ТБ}} = R_H$ . При этом КПД батареи

$$\eta = \frac{1}{2} \eta_k \left( 1 + \frac{2}{Z \cdot T_r} - \frac{1}{4} \eta_k \right)^{-1}, \quad \eta_k = (T_r - T_x) / T_r \quad (4)$$

где  $\eta_k$  - соответствует КПД идеального цикла Карно.

Для получения максимального на данном уровне температур КПД необходимо обеспечить условие

$$m(\eta_{\text{МАКС}}) = M^* - \sqrt{1 + Z \cdot T_r \cdot \eta_k} / 2$$

и тогда

$$\eta_{\text{МАКС}} = \eta_{\kappa} (M^* - 1) / \left( M + T_{\Gamma} / T_{\text{X}} \right) \quad (5)$$

Порядок выполнения работы по исследованию термоэлектрического преобразователя в режиме генератора.

1. Ознакомиться с конструкцией установки 2 и схемой измерений .
2. Записать наименования, марки и номера измерительных приборов, их класс точности и диапазон измерений.
3. Получить разрешение преподавателя, включить измерительную аппаратуру и термостат.
4. Задать на термостате необходимый уровень температуры нагретой жидкости.
5. Подать холодную и нагретую жидкость в каналы термобатареи и дождаться установления стационарного режима (ориентировочное время узнать у преподавателя).
6. Измерить напряжение холостого хода  $E_{\text{ХХ}}$  (при разорванной внешней цепи  $R_{\text{H}} = \infty$ ) и затем, устанавливая переключателем различные (заданные преподавателем) значения внешней нагрузки, записать значения токов  $I = f(R_{\text{H}})$ .
7. Провести аналогичные измерения для других значений температуры нагретой жидкости согласно заданию.
8. Сообщить преподавателю о завершении программы эксперимента и отключить: термостат, подачу жидкости к термобатарее и измерительные приборы. Показать преподавателю результаты измерений и подписать их.

Обработка результатов измерений и оформление отчета

1. Для каждого заданного уровня температур холодной и нагретой жидкости вычислить  $W_{\text{эл}} = I^2 R_{\text{H}}$  и построить графики
 
$$W_{\text{эл}} = f(R_{\text{H}})$$
2. По максимуму  $W_{\text{эл}}(R_{\text{H}})$  оценить величину  $R_{\text{ТБ}}$ , исходя из условия  $m = 1$  (1).
3. Оценить  $\eta_{\kappa}$  и  $\eta_{\text{ЭКСП}}$ , приняв  $\eta_{\text{ЭКСП}} = \frac{W_{\text{эл}}}{Q_r}$ ,
 
$$Q_r = c_p(T_{\Gamma}) \cdot G_{\Gamma} \cdot \Delta T_{\Gamma}$$
4. Оценить погрешность единичного определения  $W_{\text{эл}}, Q_r, \eta_{\kappa}, \eta_{\text{ЭКСП}}$ .

### Контрольные вопросы

1. Из каких основных узлов состоит лабораторная установка 2?
2. В каких условиях термобатарея может работать в качестве электрического генератора?
3. Как оценить мощность в генераторном режиме?

4. Какова размерность параметров в расчетных соотношениях?
5. Каково качественное влияние определяющих параметров на  $\eta$ ,  $Q_r$ ?
6. Как измеряются в опыте температуры и перепады температур?

Прямые это измерения или косвенные?

7. Какими путями можно снизить погрешность измерений исследуемых характеристик термобатареи?

#### Литература

1. А.И. Ансельм Основы статистической физики и термодинамики. - СПб.: изд. «Лань», 2007.- 448с.
2. Е.С. Платунов Физика. Т.2. Молекулярная физика и термодинамика: Учебное пособие, 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2005. – 278 с.
3. Н.Б. Варгафтик Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: изд. «Наука», 1972.- 720 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### ИНСТРУКЦИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ "Комбинированного вихревого аппарата низких температур"

#### 1. НАЗНАЧЕНИЕ

Вихревой холодильный аппарат "КВАНТ-22" (ЛЛЭ72-1831 СБ) предназначен для получения холодного воздуха с температурой до  $-40^{\circ}\text{C}$ .

Для работы аппарата требуется сжатый воздух с давлением от 2 до 8 атм.

#### 2. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АППАРАТА

Давление сжатого воздуха на входе в аппарат  $p$  до  $8 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .  
Максимальный расход сжатого воздуха:  $G = 150 \text{ кг/ч}$  или  $4 \cdot 10^{-2} \text{ кг/с}$ .  
Относительный расход холодного воздуха  $0,2 < \mu < 0,6$ . Максимальный эффект охлаждения  $T_{\text{ВХ}} - T_{\text{ХОЛ}} = 55 \div 60 \text{ К}$ .

#### 3. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

Вихревой холодильный аппарат работает на принципе энергетического разделения закрученного потока вязкого сжимаемого газа. Схема вихревого аппарата представлена на рис. 1.

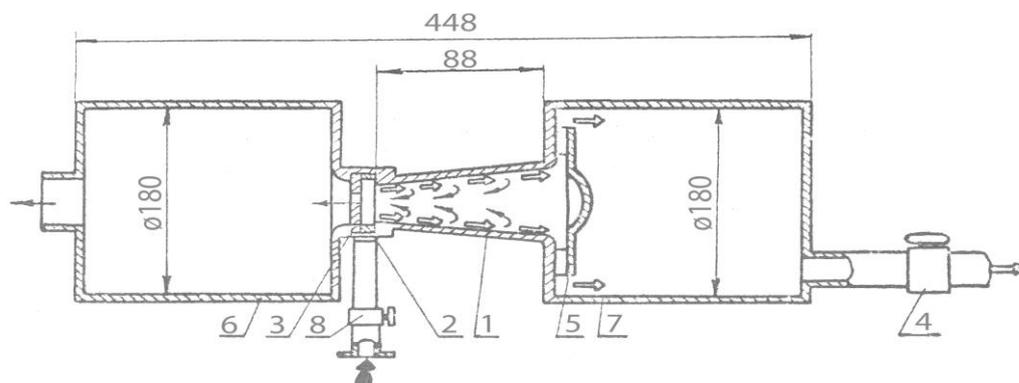


Рис. 1 Схема вихревого холодильного аппарата

Вихревой холодильный аппарат представляет собой коническую трубу 1, в которой с помощью улитки 2 закручивается сжатый воздух. Сжатый воздух поступает из магистрали по гибкому дюритовому шлангу 8 и подается в улитку через сопло прямоугольного сечения. Приосевые слои воздуха, движущегося по трубе 1, охлаждаются и отводятся через отверстие в диафрагме 3 в виде холодного потока, а периферийные слои воздуха нагреваются и отводятся через вентиль 4 в виде горячего потока. Аппарат имеет две цилиндрические камеры 6 к 7 горячего и холодного воздуха.

При сбросе холодного и горячего воздуха непосредственно в помещение, где установлен вихревой аппарат, его работа сопровождается неприятным для слуха шумом, причем при максимальных расходах

уровень звукового давления достигает 98 дБ. Для снижения уровня шума должны быть приняты следующие меры:

- обе камеры должны быть изолированы поролоном внутри и снаружи;
- горячий воздух с помощью резинового шланга должен сбрасываться за пределы помещения;
- при сбросе холодного воздуха непосредственно в помещение в камере холодного воздуха должны быть установлены два экрана с отверстиями; если холодный воздух подается в какую-либо камеру или прибор, то установка экранов не требуется.

Указанные выше меры позволяют снизить уровень шума до 80дБ (что сравнимо с уровнем шума, создаваемым вентилятором).

Более существенное снижение уровня шума достигается путем изменения конструкции раскруточного диффузора 5 (см. рис. 1). Помимо снижения уровня шума до 70 – 76 дБ при втором варианте конструкции раскруточного диффузора, более существенным оказывается исчезновение из частотного спектра шума области высоких частот (более 2000 Гц), наиболее неприятной для слуха. Однако существенно изменяются параметры холодного воздуха (эффект охлаждения падает).

#### 4. МОНТАЖ АППАРАТА

При монтаже установки следует обеспечить:

- плавное сопряжение сопла и улитки;
- отсутствие зазора между конической частью вихревой трубы и улиткой (для чего между диафрагмой и камерой холодного воздуха следует установить прокладку);
- изоляцию поролоном камер холодного и горячего воздуха внутри и снаружи).

Если холодный воздух предполагается сбрасывать непосредственно в помещение, то в камере холодного воздуха должны быть установлены два экрана с отверстиями; если же холодный воздух подается из камеры холодного воздуха вихревого аппарата в какую-либо камеру или в прибор, то установка экранов не требуется.

Если требуется получить холодный воздух с температурой не ниже (-5 ÷ -10)°С, то в камере горячего воздуха устанавливается второй вариант конструкции раскруточного диффузора, обеспечивающий более тихую работу вихревого аппарата, чем диффузор ЛЛЭ72-1868.

#### 5. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

1. Вварить в магистраль сжатого воздуха гнездо для термометра и штуцер для манометра.
2. С помощью дюритового шланга (или переходников) подсоединить вихревой аппарат к магистрали сжатого воздуха.
3. Для контроля давления сжатого воздуха установить манометр со шкалой от 0 до  $10 \cdot 10^5$  Па.
4. Для контроля температуры сжатого воздуха установить в гнездо с маслом на магистрали сжатого воздуха термометр со шкалой 0 – 50°С.

5. Для замера расхода холодного воздуха на выходе из камеры холодного воздуха установить пневмометрическую трубку (ЛЛ2.883.003 для  $G_{\text{хол}} = 30 - 50$ ; ЛЛ2.832.004 для  $G_{\text{хол}} = 40 - 90$  кг  $(3,6 \cdot 10^3 \text{ с})^{-1}$ ).

6. С помощью переходников подсоединить второй конец пневмометрической трубки к охлаждаемому изделию.

Для контроля температуры холодного воздуха ввести в поток на участке пневмометрическая трубка - охлаждаемое изделие термометр со шкалой  $(-50 \div +50)^\circ\text{C}$ .

8. Подсоединить гибкий резиновый шланг к штуцеру на камере горячего воздуха, а другой конец шланга вывести за пределы помещения.

#### 6. РАБОТА АППАРАТА

1. Открыть вентиль 8 (см. рис. 1) и измерить температуру сжатого воздуха  $T_{\text{вх}}$  на входе.

2. Задаваясь требуемой температурой холодного воздуха, определить требуемый эффект охлаждения:  $\Delta T_x = T_{\text{вх}} - T_x$ .

3. Подобрать значение давления сжатого воздуха  $p_{\text{вх}}$ , при котором обеспечивается требуемый эффект охлаждения  $T_x$  и расход  $G_x$  холодного воздуха (рис. 2)

4. По графику рис. 2,а подобрать произвольно давление (например,  $3 \cdot 10^5$  Па) и относительный расход холодного воздуха  $\mu = 0,3$ , при котором обеспечивается требуемое  $\Delta T_x$ .

5. По графику рис.2,б определить значение расхода  $G_x$  воздуха при выбранных из графика рис. 3,а значениях  $p_{\text{вх}}$  и  $\mu$ .

6. Если найденное значение расхода  $G_x$  отличается от требуемого, то следует задаться новым значением  $p_{\text{вх}}$  и подобрать из графика рис. 3,а новое, соответствующее требуемому  $\Delta T_x$  и заданному  $p_{\text{вх}}$  значением  $\mu$ .

7. Открыть вентиль 4 (см. рис. 1).

8. Открыть вентиль 8 таким образом, чтобы давление на входе в вихревой аппарат было равно  $p_{\text{вх}}$ , подобранному из графиков рис. 3 в работе №6.

9. С помощью вентиля 4 (см. рис. 1) установить требуемый расход холодного воздуха  $G_x$ .

10. После выхода установки на режим (через 3-5 мин после включения) проверить, обеспечивается ли требуемая температура  $T_x$  холодного воздуха.

11. Если температура холодного воздуха отличается от требуемой, подкорректировать ее вентилем 8 с последующей корректировкой расхода холодного воздуха вентилем 4 (см. рис. 1).

12. Проводить поочередно корректировку температуры холодного воздуха  $T_{\text{хол}}$ , расхода холодного воздуха  $G$ , вентилями 8 и 4 до тех пор, пока не будут достигнуты требуемые значения  $T_x$ ,  $G_x$ .

13. Занести в журнал наблюдений значения  $p_{\text{вх}}$ ,  $G_x$ ,  $T_{\text{вх}}$ ,  $T_x$ ,  $\Delta T_x$ .