

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра теплогазоснабжения, вентиляции и гидромеханики

С.А. САНДАКОВ

И.А. ПИКУЛЕВ

# **ТЕРМОДИНАМИКА**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Рекомендовано к изданию

Редакционно-издательским советом  
государственного образовательного учреждения  
высшего профессионального образования  
«Оренбургский государственный университет»

Оренбург 2008

УДК 621.74.043

ББК 34.663Я7

С 18

Рецензент

доктор технических наук, профессор А.С. Павлов

**Сандаков С.А.**

**С 18      Термодинамика: методические указания к лабораторным работам /С. А. Сандаков, И. А. Пикулев - Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2008. – 58 с.**

Методические указания предназначены для студентов, изучающих курс теплотехники с выполнением лабораторного практикума по термодинамике. Основная цель лабораторного практикума - закрепить теоретические положения курса и ознакомить с методикой проведения несложных термодинамических экспериментов. В настоящих указаниях приводятся краткая теория, описание и руководство к выполнению семи лабораторных работ. При подготовке к собеседованию с преподавателем по выполненным лабораторным работам необходимо изучить устройство и принцип действия экспериментальной установки, методику определения искомых величин или зависимостей и освоить основы теории к работе, используя лекционный материал и рекомендуемую литературу по данной дисциплине.

ББК 34.663Я7

© Сандаков С.А.

Пикулев И.А. 2008

© ГОУ ОГУ 2008

## Содержание

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 Лабораторная работа № 1 «Исследование изохорного процесса».....                                                     | 4  |
| 2 Лабораторная работа № 2 «Исследование изотермного процесса».....                                                    | 8  |
| 3 Лабораторная работа № 3 «Исследование процесса изотермного сжатия».                                                 | 13 |
| 4 Лабораторная работа № 4 «Определение изобарной теплоемкости воздуха» .....                                          | 20 |
| 5 Лабораторная работа № 5 «Изучение процесса адиабатного истечения газа через суживающееся сопло».....                | 26 |
| 6 Лабораторная работа № 6 «Исследование процессов во влажном воздухе» .....                                           | 44 |
| 7 Лабораторная работа № 7 «Определение зависимости температуры от давления для насыщенного пара методом кипения»..... | 54 |
| 8 Литература, рекомендуемая для изучения курса «Термодинамика».....                                                   | 58 |

# 1 Лабораторная работа № 1

## «Исследование изохорного процесса»

*Цель работы: изучение характеристик изохорного процесса при подводе теплоты к газу.*

При подводе теплоты к газу в замкнутом сосуде с жесткими стенками имеет место изохорный процесс и все подводимое тепло в соответствии с 1-м законом термодинамики расходуется на изменение внутренней энергии:

$$Q = \Delta U + p \cdot \Delta V \quad (1.1)$$

$$Q = \Delta U = c_v \cdot \Delta T \quad (1.2)$$

В области малых давлений и температур состояние газа описывается уравнением Клапейрона-Менделеева, а так как температура изменяется существенно, процесс можно считать квазиравновесным.

Уравнение процесса имеет вид:

$$\frac{p}{T} = const \quad (1.3)$$

или

$$\frac{\Delta p}{\Delta T} = const \quad (1.4)$$

Регистрируя изменение давление и температуры в ходе процесса можно построить его кривую в координатах  $pT$ , а также определить константу и построить расчетную кривую.

## Описание экспериментальной установки

Схема лабораторной установки показана на рисунке 1.1. Нагреваемый газ находится в колбе 1, помещенной в термостат 5 типа ТС-16 М. Температура в колбе регистрируется термопарой, подсоединенной к потенциометру 4 типа КСП-4. Давление регистрируется дифференциальным манометром 3. С атмосферой колба 1 сообщается краном 2. Температура воды в термостате измеряется термометром 6.

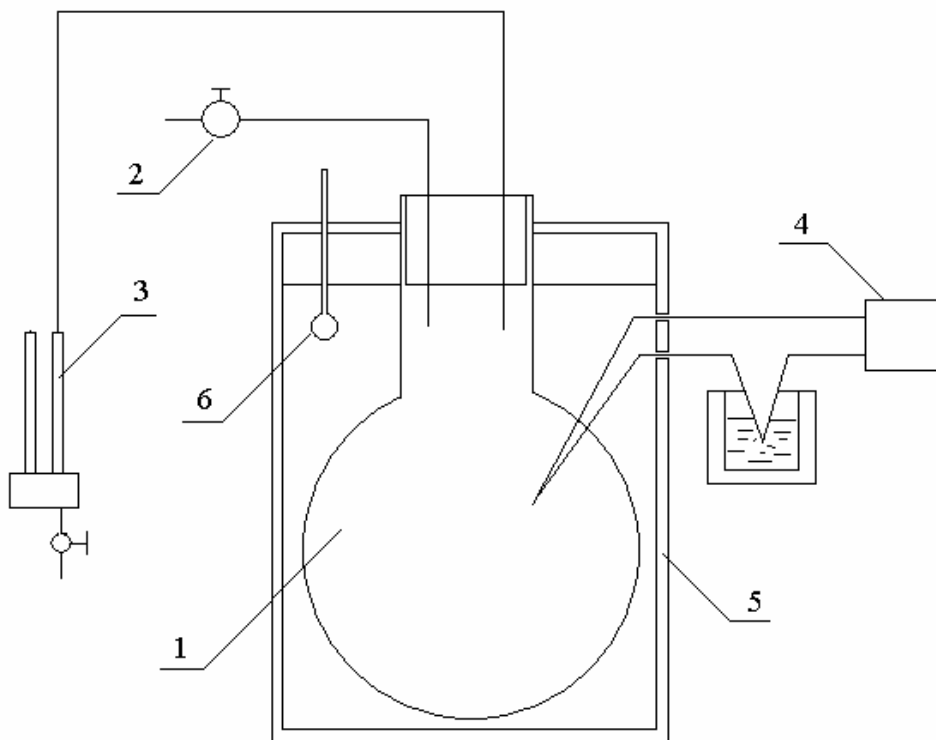


Рисунок 1.1 - Схема лабораторной установки

## Порядок проведения опытов

После ознакомления с настоящими указаниями следует осмотреть установку и подготовить таблицу наблюдений по прилагаемой форме (таблица 1.1).

Перед проведением эксперимента следует:

- установку, включая холодный спай в схеме термопары, необходимо термостатировать;
- кран 2 открыть;
- при этом по дифманометру 3 должен фиксироваться нулевой перепад давления ( $\Delta p = 0$ );
- нагреватель и мешалку термостата отключить.

В начале опыта кран 2 закрыть и зафиксировать:

- температуру в колбе 1 по потенциометру 4;
- $\Delta p = 0$  - по дифманометру 3;
- температуру воды в термостате по термометру 6.

Через каждую минуту фиксировать:

- давление  $p$  в системе по дифманометру 3;
- температуру воды в термостате  $t_t$  термометром 6;
- температуру в системе  $t$  по потенциометру 4;

Затем включить нагреватель термостата и мешалку.

Наблюдения проводить до достижения  $t = 32$  °С. Далее нагреватель и мешалка отключаются и открывается кран 2.

## **Обработка результатов эксперимента**

По результатам опытов строится кривая процесса в  $pT$ –координатах:

$$\frac{\Delta p}{\Delta T} = const$$

Подсчитывается среднее значение константы в уравнении процесса и на график наносится расчетная кривая процесса.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- цель работы;
- краткие теоретические положения;
- схему и описание установки;
- обработку результатов наблюдений;
- график процесса;
- анализ полученных результатов.

Исходные данные:

Плотность жидкости в манометре  $\rho = \underline{\hspace{2cm}}$  кг/м<sup>3</sup>

Таблица 1.1 - Результаты наблюдений и расчетов

| № изме-<br>рения | $t_T$<br>°C | E<br>мВ | t<br>°C | $\Delta t$<br>°C | $h_1$<br>мм | $h_2$<br>мм | $\Delta h$<br>мм | $\Delta p$<br>Па |
|------------------|-------------|---------|---------|------------------|-------------|-------------|------------------|------------------|
| 1                |             |         |         |                  |             |             |                  |                  |
| 2                |             |         |         |                  |             |             |                  |                  |
| 3                |             |         |         |                  |             |             |                  |                  |
| 4                |             |         |         |                  |             |             |                  |                  |
| 5                |             |         |         |                  |             |             |                  |                  |

### Контрольные вопросы

1. Приведите примеры функции состояния термодинамической системы
2. Какие величины связывает между собой уравнение Клапейрона - Менделеева?
3. Сформулируйте закон Дальтона и закон Амага.
4. Уравнение процесса.
5. Графическое изображение процессов в  $pV$  – и  $TS$ - координатах.
6. Взаимосвязь между параметрами начальной и конечной точек процесса.
7. Изменение внутренней энергии.
8. Определение работы и количества теплоты, участвующей в процессе.
9. Физический смысл  $pV$  – диаграммы.

## 2 Лабораторная работа № 2

### «Исследование изотермного процесса»

*Цель работы: Изучение характеристик изотермного процесса расширения воздуха.*

Изотермным называется термодинамический процесс, протекающий при неизменной температуре ( $dT = 0$ ). При изотермном расширении газ осуществляет работу против внешних сил давления. Эта работа производится за счёт подводимой из окружающей среды теплоты. При сжатии газа, наоборот, выделяется теплота, которая переходит в окружающую среду. Следовательно, изотермный процесс является самым «выгодным» процессом подвода теплоты к рабочему телу, так как в нём тепло расходуется только на выполнение работы расширения, внутренняя энергия газа при этом не изменяется ( $dU = 0$ ). В соответствие с 1-м законом термодинамики можно записать:

$$dQ = dU + pdV \quad (2.1)$$

но так как в изотермном процессе внутренняя работа равна  $dU = c_v dT$ , то:

$$dQ_t = c_v dT + pdV = pdV \quad (2.2)$$

Следует отметить, что изотермные процессы подвода и отвода теплоты являются неотъемлемой частью цикла Карно.

В данной лабораторной работе подвод тепла осуществляется к воздуху при практически атмосферном давлении, благодаря чему воздух может рассматриваться как идеальный газ, а малые изменения параметров делают процесс квазиравновесным.



Изотермный процесс в идеальном газе подчиняется закону Бойля-Мариотта, по которому для данной массы газа при неизменной температуре произведение численных значений давления и объёма есть величина постоянная:

$$pV = \text{const} \quad (2.3)$$

В термодинамической  $pV$ -диаграмме изотермный процесс изображается изотермой 1-2 (рисунок 2.1).

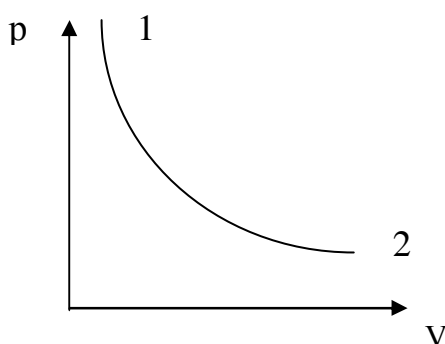


Рисунок 2.1 – Изображение изотермного процесса в  $pV$ - координатах

### **Описание экспериментальной установки**

Схема лабораторной установки приведена на рисунке 2.2. В колбе 1, имеющей светозащитное покрытие, находится нагреватель 10, питание к которому подаётся от сети 220 В через автотрансформатор 15 и выпрямитель 12. Электрические параметры нагревателя регистрируются по показаниям приборов 13 и 14. Температура в колбе регистрируется термопарой 6 с помощью потенциометра 9 типа КСП-4. Колба 1 соединена воздушным трактом (полимерными трубками) с дифференциальным манометром 4 и стеклянным цилиндром 2, опущенным в сосуд с водой. Сообщение колбы с атмосферой осуществляется с помощью крана 5. В воздушном тракте вне колбы теплообмен практически отсутствует.

Если отключить колбу от атмосферы краном 5, а затем опустить цилиндр 2, то в колбе создается избыточное давление, регистрируемое дифференциальным манометром 4. Условие изотермичности при подводе тепла к газу обеспечивается путём намеренного поднятия цилиндра 2. При этом объём газа увеличивается, а его давление уменьшается.

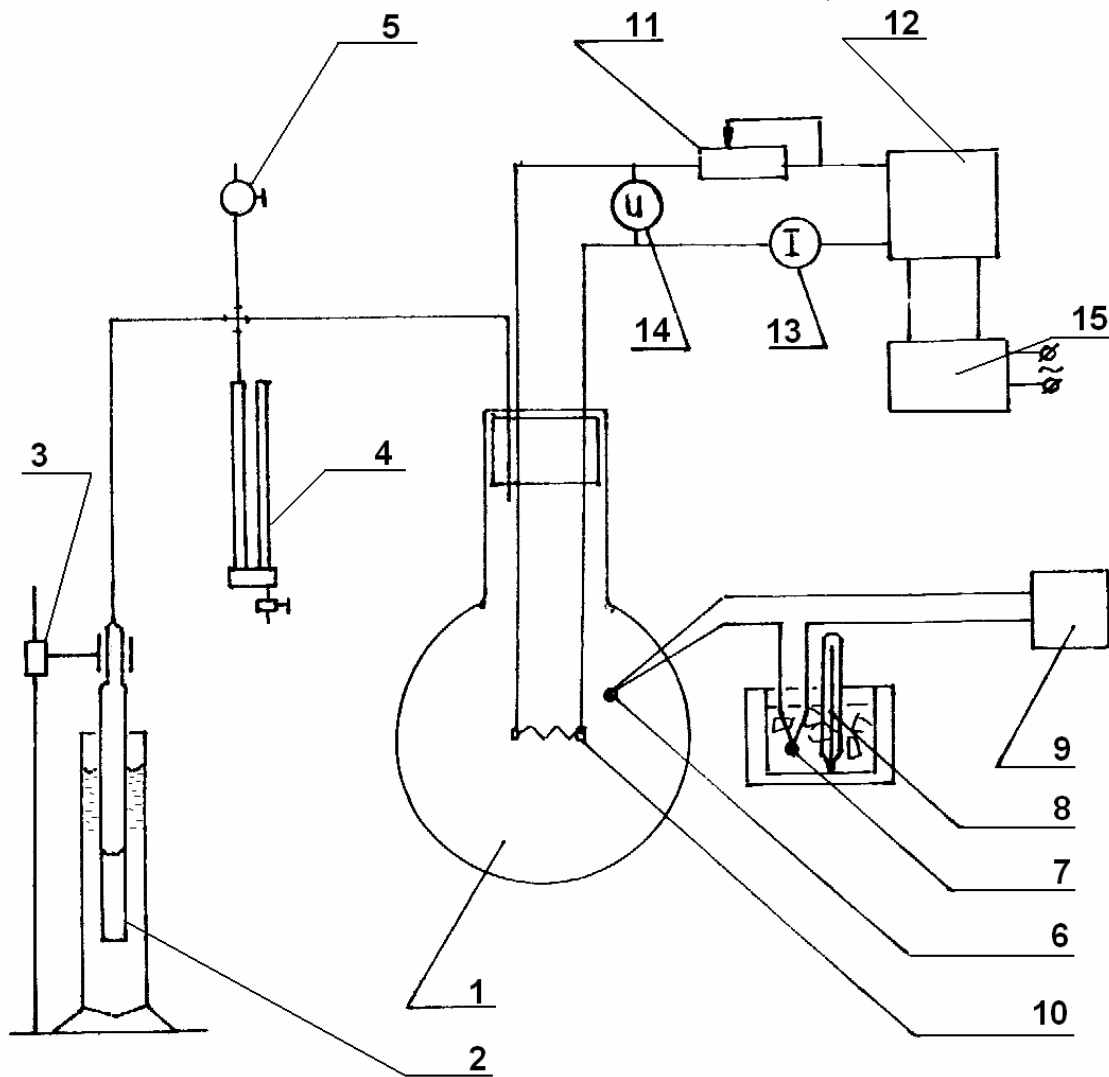


Рисунок 2.2- Схема лабораторной установки

## Порядок проведения эксперимента

Перед началом работы температура в колбе должна быть близка к температуре воздуха в помещении, кран 5 – открыт. Цилиндр 2 опускается в воду таким образом, чтобы глубина его погружения не превышала 5 мм.

Последовательность выполнения работ в опыте следующая:

- закрыть кран 5, а цилиндр 2 опустить до положения, при котором перепад давления по дифманометру 4 составит около 150 мм водяного столба. Объём воды, вошедшей в цилиндр, составит при этом примерно 10 мл;

- зарегистрировать: температуру в колбе  $t$  с помощью потенциометра 9, избыточное давление  $\Delta p$  по дифманометру 4, отсчёт уровня воды (в мл) в цилиндре 2;

- подать питание на нагреватель, установив электрическую мощность  $W = IU = 0,005 \text{ Вт}$  ( $I = 14 \text{ мА}$ ,  $U = 360 \text{ мВ}$ ). Начать отсчёт времени по секундомеру;

- через 1 минуту увеличить объём газа на 2 мл подъёмом цилиндра.

2. Измерить температуру газа  $t$ , записать давление  $\Delta p$  и отсчёт уровня в цилиндре;

- повторять действия предыдущего пункта до достижения  $\Delta p = 0$ ;

- отключить нагреватель и открыть кран 5.

## Обработка результатов эксперимента

На масштабной бумаге в координатах  $pV$  построить график функции  $\Delta p = f(\Delta V)$ .

Учитывая, что суммарный объём колбы, воздушного тракта и цилиндра равен  $V$  (мл) и определив атмосферное давление по барометру, вычислить

константу в уравнении (2.2). На том же графике нанести расчётную кривую, определённую по уравнению (2.2).

Отчёт по лабораторной работе должен содержать:

- краткие теоретические положения;
- схему и описание лабораторной установки;
- обработку результатов опыта;
- графики;
- анализ полученных результатов.

Исходные данные:

Начальный объём воздуха  $V_0 = \underline{\hspace{2cm}}$  мл

Атмосферное давление  $p_a = \underline{\hspace{2cm}}$  Па

Плотность жидкости в манометре  $\rho = \underline{\hspace{2cm}}$  кг/м<sup>3</sup>

Таблица 2.1 - Результаты наблюдений и расчетов

| № п/п | Отсчёт времени сек | Отсчёт уровня, мл | $\Delta V$ , мл | $h_1$ мм | $h_2$ мм | $\Delta h$ мм | $\Delta p$ , Па | $E$ , мВ | $t$ , °С |
|-------|--------------------|-------------------|-----------------|----------|----------|---------------|-----------------|----------|----------|
| 1     | 0                  |                   | 0               |          |          |               |                 |          |          |
| 2     | 60                 |                   |                 |          |          |               |                 |          |          |
| 3     | 120                |                   |                 |          |          |               |                 |          |          |

### Контрольные вопросы

1. Уравнение изотермного процесса.
2. Графическое изображение изотермного процесса в  $pV$  – и  $TS$ -координатах.
3. Взаимосвязь между параметрами начальной и конечной точек процесса.
4. Изменение внутренней энергии в изотермном процессе.
5. Определение работы и количества теплоты, участвующей в процессе.

6. Физический смысл  $TS$  – диаграммы.
7. Написать уравнение количества теплоты через среднюю теплоемкость.
8. Какая функция называется энтропией.
9. Изменение энтальпии в изотермном процессе.
10. Что называется энтальпией.

### 3 Лабораторная работа № 3

#### «Исследование процесса изотермного сжатия»

*Цель работы: продолжить изучение изотермного процесса изменения состояния идеального газа. Выполнить опытную проверку закона Бойля-Мариотта ( $pV = \text{const}$ ) и рассчитать работу сжатия в процессе.*

Соотношение между параметрами состояния в изотермном процессе определяется из уравнения Клапейрона:

$$pV = mRT = \text{const} \quad (3.1)$$

или

$$p_1V_1 = p_2V_2, \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1} \quad (3.2)$$

Из уравнения (3.2) следует, что изменение давления в изотермном процессе обратно пропорционально изменению объема. Уравнение изотермы в  $pV$  - координатах будет уравнением равнобокой гиперболы:  $pV = \text{const}$ .

Удельная работа определяется из уравнения, Дж/кг:

$$\ell = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad (3.3)$$

Записывая уравнение изотермного процесса для двух точек, имеем

$$pV = p_1V_1$$

откуда  $p = p_1 \frac{V_1}{V}$ , подставляя это выражение в уравнение (3.3) и интегрируя его в пределах от  $V_1$  до  $V_2$  получим:

$$\ell = p_1V_1 \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = p_1V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (3.4)$$

Графически работа сжатия любого термодинамического процесса может быть определена в  $pV$ -диаграмме как площадь под кривой процесса (рисунок 3.1).

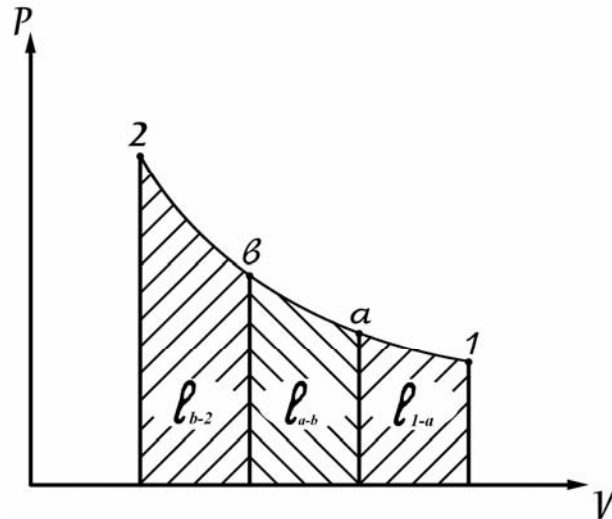


Рисунок 3.1 – Изотермный процесс в  $pV$ - координатах

При таком определении работы весь процесс 1-2 разделяется на ряд элементарных процессов: 1- а, а - в, в – 2.

Работа каждого из них рассчитывается следующим образом, Дж/кг:

$$l_{1-a} = p_{cp(1-a)} \Delta V_{1-a} = \frac{p_1 + p_a}{2} (V_a - V_1), \quad (3.5)$$

$$l_{a-b} = p_{cp(a-b)} \Delta V_{a-b} = \frac{p_a + p_b}{2} (V_b - V_a), \quad (3.6)$$

$$l_{b-2} = p_{cp(b-2)} \Delta V_{b-2} = \frac{p_b + p_2}{2} (V_2 - V_b), \quad (3.7)$$

где:  $p_1, p_a, p_b, p_2, \left[ \frac{H}{M^2} \right]$  - абсолютное давление воздуха в точках 1, а, в, 2;

$V_1, V_a, V_b, V_2, \left[ \frac{M^3}{кг} \right]$  - удельный объем воздуха соответственно в точках 1, а, в, 2.

Работа сжатия в процессе 1-2 равна сумме работ отдельных элементарных процессов:

$$l_{1-2} = l_{1-a} + l_{a-\epsilon} + l_{\epsilon-2} \quad (3.8)$$

#### Программа работы

1. Опытным путем установить взаимосвязь между  $p$  и  $V$  в изотермическом процессе сжатия воздуха.
2. Найти аналитическую работу сжатия 1 кг воздуха в указанном процессе.
3. Определить графически работу сжатия 1 кг воздуха в указанном процессе, построить диаграмму процесса в  $pV$  – координатах.

#### Описание и схема экспериментальной установки

Для экспериментальной проверки изотермического процесса сжатия воздуха служит установка, схема которой приведена на рисунке 3.2.

Установка состоит из неподвижного сосуда 5 и подвижной бюретки 3, соединенных между собой полимерной трубкой 4; в неподвижном сосуде и бюретке налита вода, которая производит сжатие рабочего тела – воздуха. Бюретка может занимать несколько положений: 1, а, в, 2 на специальных крючках, а в верхней части имеет двухходовый кран 2, дающий возможность изолировать находящийся в ней воздух и производить его сжатие за счет водяного столба.

К нижней части подвижной бюретки прикреплена линейка 1, по которой измеряют высоту воздушного столба  $H$ . Эта величина необходима для расчета объема воздуха в бюретке в каждом из ее положений.

Между подвижным сосудом и бюреткой расположена шкала, которая позволяет определить разность уровней воды  $h$ , т.е. избыточное давление.



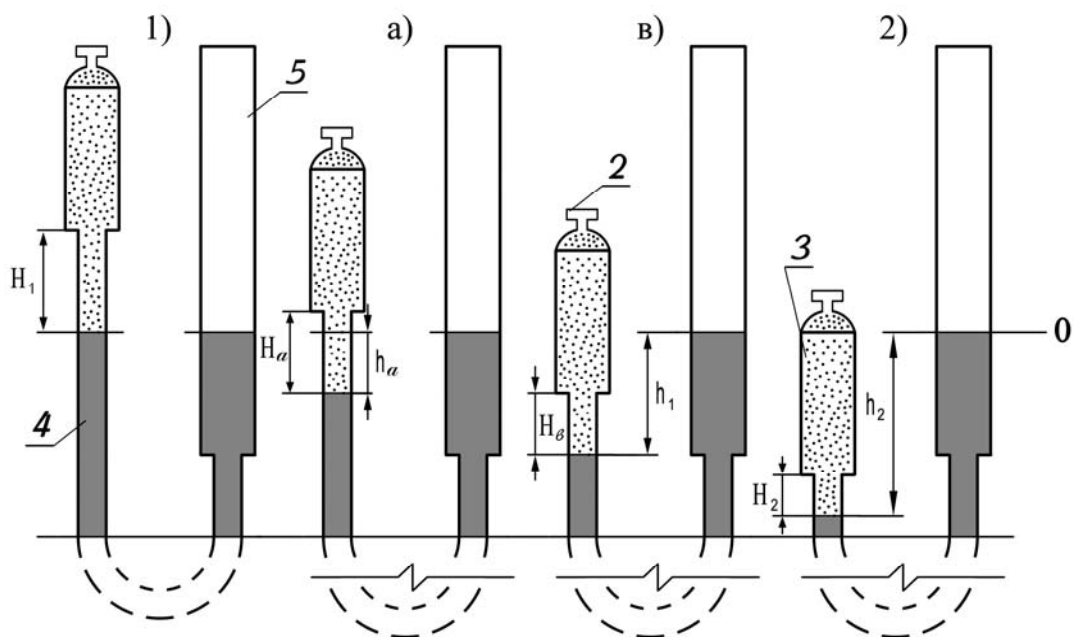


Рисунок 3.2 - Схема лабораторной установки

### Порядок проведения опытов

#### 1. Положение бюретки «1».

Двухходовой кран открыт (рисунок 3.2), при этом уровень воды в сосуде и бюретке должен находиться на отметке «0», т.к. это сообщающиеся сосуды. Если уровень воды ниже нуля, то в бюретку доливают воду до нужного уровня. Затем закрывают двухходовой кран и отсчитывают начальные параметры  $h_1$  и  $H_1$ , записывая их в таблицу 3.1. Для проверки герметичности закрытия крана перевешивают бюретку в нижнее положение, выжидают 1-2 минуты и переносят бюретку в положение 1. При этом уровень воды в бюретке должен совпадать с нулевой отметкой. Если уровень воды не совпадает – значит кран был закрыт негерметично - необходимо добиться его герметичности.

#### 2. Положение бюретки «а».

Бюретку перемещают вниз на следующий крючок и закрепляют ее в этом положении. Выжидают 1-2 минуты для наступления теплового равнове-

сия, т.е. чтобы температура воздуха в бюретке стала равна температуре помещения. Затем измеряют параметры  $H_a$  и  $h_a$  в мм. вод. столба и заносят их в таблицу 1.

3. Повторяют пункт 2 для всех последующих положений бюретки, перевешивая ее последовательно на другие крючки. В каждом положении измеряют значение  $H_i$  и  $h_i$ , а полученные значения записывают в таблицу 3.1.

4. Измеряют температуру воздуха в помещении и атмосферное давление в мм. рт. ст. по барометру. Результаты записывают в таблицу 3.1.

### Обработка результатов эксперимента

1. Подсчитывается абсолютное давление воздуха в бюретке при всех ее положениях по формуле, Па:

$$p_i = B + h_i.$$

При этом атмосферное и избыточное давление необходимо выразить в одной размерности (Па).

2. Рассчитывается объем воздуха в бюретке

$$V = V_B + H_i \frac{\pi d_{\text{вн}}^2}{4},$$

где  $V_B$  - объем верхней части бюретки ( $\text{см}^3$ ), постоянная величина;

$H_i$  - высота столба воздуха в цилиндрической части бюретки (см);

$d_{\text{вн}}$  - внутренний диаметр бюретки (см).

3. Подсчитывается произведение  $p_i V_i$ .

Проверяется соответствие этого произведения закону изотермного процесса:  $pV = \text{const}$ .

4. Определяется масса воздуха в бюретке:

$$m = \frac{p_i V_i}{RT}$$

5. Подсчитывается удельный объем воздуха (значения заносятся в таблицу 3.2):

$$v_i = \frac{V_i}{m}$$

6. Определяется изменение удельного объема воздуха в каждом из элементарных процессов:

$$\Delta v_1 = v_a - v_1; \Delta v_2 = v_6 - v_a; \Delta v_3 = v_2 - v_6$$

7. Определяется среднее абсолютное давление в каждом из процессов:

$$p_l = \frac{p_{i+1} + p_i}{2}$$

8. Подсчитывается работа сжатия в каждом из элементарных процессов (таблица 3.2).

9. Определяется общая работа сжатия в процессе 1-2.

Таблица 3.1- Результаты выполненного эксперимента

| Положение бюретки | Температура воздуха |   | Атмосферное давление, В |    | Давление воздуха в бюретке |    |            | Высота цилиндра, Н | Объем воздуха в бюретке |                 | Произведение   |
|-------------------|---------------------|---|-------------------------|----|----------------------------|----|------------|--------------------|-------------------------|-----------------|----------------|
|                   |                     |   |                         |    | избыточное                 |    | абсолютное |                    |                         |                 |                |
|                   | °С                  | К | мм. рт. ст              | Па | мм. вод. ст.               | Па |            | Па                 | см                      | см <sup>3</sup> | м <sup>3</sup> |
| 1                 |                     |   |                         |    |                            |    |            |                    |                         |                 |                |
| 2                 |                     |   |                         |    |                            |    |            |                    |                         |                 |                |

Таблица 3.2 – Результаты аналитического расчета работы сжатия

| Удельный объем воздуха | Процессы | Изменение объема в процессе | Среднее абсолютное давление в процессе | Работа изотермного сжатия |
|------------------------|----------|-----------------------------|----------------------------------------|---------------------------|
| м <sup>3</sup> /кг     |          | м <sup>3</sup> /кг          | Н/м <sup>2</sup>                       | Дж/кг                     |
|                        | 1 - а    |                             |                                        |                           |
|                        | а - в    |                             |                                        |                           |
|                        | в - 2    |                             |                                        |                           |

Примечание: 1 мм. рт. ст. = 133,4 Н/м<sup>2</sup>; 1 мм. вод. ст. = 9,1 Н/м<sup>2</sup>

### Контрольные вопросы

1. Написать уравнения основных процессов.
2. Графическое изображение основных процессов в  $pV$  – координатах.
3. Взаимосвязь между параметрами начальной и конечной точек процесса.
4. Определение работы и количества теплоты, участвующей в процессе.
5. Физический смысл  $pV$  – диаграммы.
6. Написать формулы соотношений между основными параметрами в каждом процессе.
7. Написать формулы работы изменения объема газа для каждого процесса.
8. Написать формулы располагаемой (полезной) работы для каждого процесса.
9. Какой процесс называется политропным.
10. Написать уравнение политропы и указать, в каких пределах изменяется показатель политропы.
11. По каким уравнениям вычисляется изменение энтропии в изохорном, изобарном, изотермном, адиабатном и политропном процессах.

## 4 Лабораторная работа № 4

### «Определение изобарной теплоемкости воздуха»

*Цель работы: определение численных значений изобарной теплоемкости воздуха как функции от температуры*

При вычислении теплоты, необходимой для нагрева газов, необходимо правильно выбрать численное значение теплоемкости, которое зависит от множества факторов, таких как: характеристик газа, давления, температуры и др.

Каждому термодинамическому процессу отвечает свое числовое значение теплоемкости, меняющееся в пределах  $\pm\infty$ , переходя при адиабатном процессе через ноль. При этом особая роль отводится экспериментально определяемым изобарной и изохорной теплоемкостям, так как все другие могут быть вычислены через них. Известно, что теплоемкость в политропном процессе вычисляется по формуле:

$$c = \frac{nc_v - c_p}{n-1} = c_v \frac{n-k}{n-1} \quad (4.1)$$

где  $c$  - удельная теплоемкость в данном политропном процессе, Дж/ кг К;

$c_v$  - удельная изохорная теплоемкость, Дж/ кг К;

$c_p$  - удельная изобарная теплоемкость, Дж/ кг К;

$n$  - показатель степени в уравнении политропы;

$k$  - показатель степени в уравнении адиабаты.

В лабораторной работе определяется удельная изобарная теплоемкость воздуха методом проточного калориметрирования. В этом случае основное расчетное уравнение принимает вид:

$$Q = V_0 c'_{pm} (t_2 - t_1) \quad (4.2)$$

где  $V_0$  - расход воздуха, замеренный в опыте и приведенный к нормальным физическим условиям,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$c'_{pm}$  - средняя объемная теплоемкость воздуха при постоянном давлении в интервале температур  $t_1 \dots t_2$ ,  $\text{Дж}/\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С}$ ;

$t_1$  - температура воздуха при входе в установку,  $^\circ\text{С}$ ;

$t_2$  - температура воздуха при выходе из установки,  $^\circ\text{С}$ ;

$Q$  - количество теплоты, усвоенной воздухом в единицу времени, определяемое по мощности электронагревателя, Вт.

### **Описание экспериментальной установки**

Лабораторная установка (рисунок 4.1) состоит из стеклянной трубки 1, являющейся калориметром, в которой происходит нагрев воздуха при омывании им электронагревателя 2, размещенного внутри трубки.

Температура воздуха на входе в калориметр замеряется комнатным термометром, а на выходе – термопарой 10, подсоединенной к потенциометру 9 типа КСП-4. Объем воздуха, прокачиваемый вентилятором 8 через калориметр, измеряется ротаметром 3. Перевод показаний ротаметра в расход производится с помощью тарировочного графика,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Вентилятор приводится во вращение электродвигателем 7, напряжение которого, а следовательно и частота вращения, регулируется автотрансформатором 6. Питание на электронагреватель подается от автотрансформато-

ра 4 через измерительный комплект 5 типа К-505. Оба автотрансформатора включаются в сеть переменного тока напряжением 220 В.

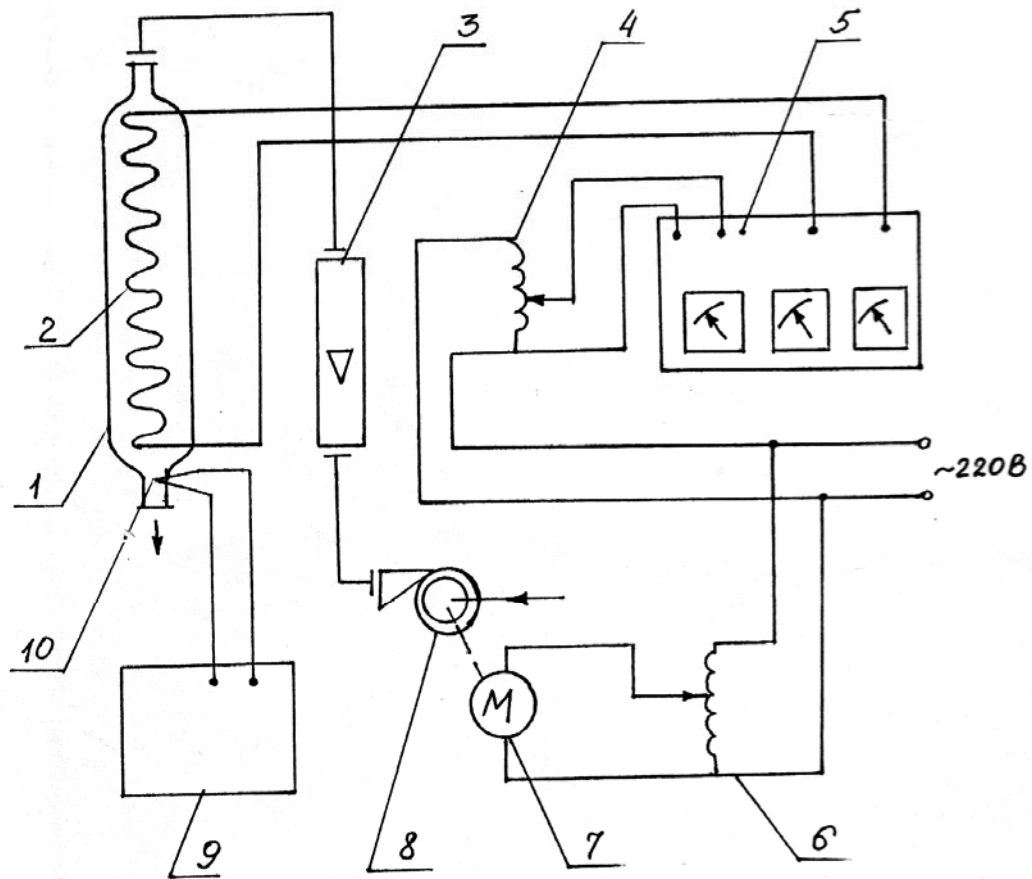


Рисунок 4.1 - Схема лабораторной установки

### Подготовка установки к работе

Основным требованием при проведении лабораторной работы является осуществление установившегося теплового режима, при котором расход воздуха в единицу времени и температура на входе и выходе приобретают постоянные значения. Это происходит примерно через 30-40 минут после начала опыта.

Перед началом работы необходимо проверить электрическую схему установки и положение переключателей измерительного комплекса. Вращением рукояток автотрансформаторов подают напряжение на электродвигатель вентилятора и электронагреватель.

В данной лабораторной работе теплоемкость воздуха измеряется при трех режимах. Предельное значение напряжения на нагревателе не должно превышать 100 В.

После достижения каждого установившегося теплового режима с помощью потенциометра измеряется температура воздуха на выходе из калориметра, записываются показания электроизмерительных приборов и расход воздуха по ротаметру. Температура воздуха на входе в калориметр принимается равной температуре в помещении.

### **Обработка результатов эксперимента**

Искомая средняя объёмная удельная теплоёмкость, отнесённая к интервалу температур, в котором осуществляется нагрев воздуха, определяется по формуле:

$$c'_{pm} = \frac{Q}{V_0(t_2 - t_1)} \quad (4.3)$$

Расход воздуха  $V_0$ , замеряемый по показаниям ротаметра, приводится к нормальным физическим условиям, при этом:

$$V_0 = V \frac{p}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T} \quad (4.4)$$

где  $p$  – давление воздуха в помещении при проведении опыта, Па;



$T$  - абсолютная температура воздуха в помещении при проведении опыта, К;

$p_0$  - нормальное атмосферное давление, равное 101302 Па;

$T_0$  - нормальная абсолютная температура, равная 273,15 К.

Переход от объёмной теплоёмкости к весовой производится по соотношению:

$$c_{pm} = c'_{pm} \frac{22,4}{\mu} \quad (4.5)$$

где  $\mu$  – средняя молекулярная масса воздуха,  $\mu = 29$  кг/кмоль.

Отчёт должен содержать:

- краткие теоретические положения;
- схему лабораторной установки;
- обработку результатов опытов;
- график зависимости теплоёмкости от температуры.

Исходные данные:

Барометрическое давление  $p = \underline{\hspace{2cm}}$  Па

Температура воздуха в помещении  $t_1 = \underline{\hspace{2cm}}$  °С

Поправка на температуру свободных  
концов термопары  $E_0 = \underline{\hspace{2cm}}$  мВ

Таблица 4.1 - Протокол испытаний

| № опыта | E, мВ | E', мВ | t <sub>2</sub> , °С | h <sub>рот</sub> , дел. | V <sub>0</sub> , м <sup>3</sup> /с | U, В | I, А | Q, Вт |
|---------|-------|--------|---------------------|-------------------------|------------------------------------|------|------|-------|
| 1       |       |        |                     |                         |                                    |      |      |       |
| 2       |       |        |                     |                         |                                    |      |      |       |
| 3       |       |        |                     |                         |                                    |      |      |       |

### Контрольные вопросы

1. Дать определение удельной теплоемкости.
2. Написать уравнение количества теплоты через среднюю теплоемкость.
3. Объяснить смысл всех величин, входящих в уравнение Майера.
4. Написать уравнения массовой, объемной и мольной теплоемкостей для газовых смесей.
5. Вычисление энтропии идеального газа для обратимого и необратимого процессов.
6. Дать определение истинной и средней теплоемкостей.
7. Отношение теплоемкостей  $c_p$  и  $c_v$ .
8. Определение средней теплоемкости смеси газов.
9. Средняя молекулярная масса смеси газов.
10. Уравнение Ван-дер-Ваальса для реальных газов.
11. Аналитическое выражение первого закона термодинамики.
12. Аналитическое выражение работы процесса.
13. Дать определение энтальпии как функции процесса.

## 5 Лабораторная работа № 5

### «Изучение процесса адиабатного истечения газа через суживающееся сопло»

*Цель работы: экспериментальное и теоретическое исследование термодинамических характеристик процесса истечения газа из суживающегося сопла, понимание физических особенностей процесса истечения газа, выполнение работы и проведение требуемых расчетов в процессе исследования и анализ его результатов*

Процессы движения газа, происходящие в различных теплотехнических установках, связаны с преобразованием энергии в газовом потоке, поэтому термодинамическое исследование процессов движения газа по каналам имеет большое практическое значение. Основные положения теории истечения газов позволяют рассчитать проточную часть паровых и газовых турбин, реактивных двигателей, центробежных и осевых компрессоров и многих других узлов.

Расчеты рабочих процессов этих установок строятся на общих положениях теории газового потока. Эта теория базируется на основных положениях термодинамики и на ряде допущений, к числу которых относятся следующие:

а) стационарность потока, т.е. параметры потока не меняются во времени, отсюда вытекает постоянство массового расхода газа ( $G = \text{const}$ );

б) отсутствие трения о стенки канала и теплообмена с внешней средой, т.е. течение адиабатное ( $dq = 0$ );

в) течение одномерное ( $dw/dr = 0$ ) и меняется только вдоль канала  $w = w(x)$ ;

г) газ идеальный и теплоемкость его постоянна  $c_p = \text{const}$  (или  $c_v = \text{const}$ );

д) потенциальная энергия постоянна  $gdh = 0$ ;  $dl_{\text{гex}} = 0$ , так как канал закреплен.

При конструировании проточных частей энергетических устройств практически важным является вопрос о том, какой профиль должен иметь канал, по которому движется газовый поток или пар. Такими каналами являются сопла и диффузоры.

Если при течении газа или пара техническая работа отсутствует, то по уравнению первого закона термодинамики имеем:

$$d \frac{c^2}{2} = -v dp; \quad c ds = -v dp \quad (5.1)$$

Отсюда видно, что при течении газа или пара по неподвижному каналу знаки изменения давления и изменения скорости противоположны. Следовательно, если при течении рабочего тела давление его уменьшается, то скорость растет и наоборот.

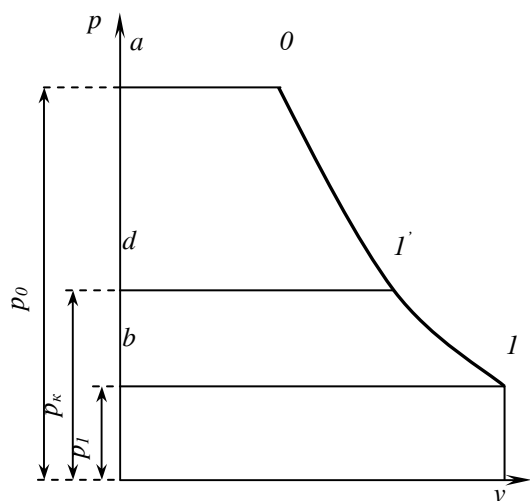


Рисунок 5.1 - Графическое изображение располагаемой работы в  $pV$ -диаграмме

Неподвижные каналы, в которых происходит уменьшение давления рабочего тела и рост скорости движения, называют соплами.

Неподвижные расширяющиеся каналы, в которых уменьшается скорость движения рабочего тела и растет его давление, называются диффузорами.

Приращение кинетической энергии рабочего тела, получаемое за счет понижения его давления в

соплах, может быть затем использовано для получения полезной работы.

Приращение кинетической энергии в обратимом процессе течения газа или пара в соплах называется располагаемой работой и определяется как:

$$d \frac{c^2}{2} = -vdp; \quad \frac{c_1^2 - c_0^2}{2} = -\int_0^1 vdp \quad (5.2)$$

Если процесс понижения давления газа или пара в соплах изобразить в  $pv$  – диаграмме линией 0-1 (рисунок 5.1), то можно увидеть, что площадь

$a - 0 - 1 - b$  равна  $-\int_{p_0}^p vdp$ . Следовательно, располагаемая работа в  $pv$  – диаграмме в определенном масштабе изображается площадью, ограниченной линией процесса, крайними абсциссами и осью ординат.

Масса рабочего тела, протекающего в секунду через данное сечение канала, называется секундным массовым расходом или просто секундным расходом газа или пара и обозначается  $M$ .

Если  $F$  – площадь некоторого сечения канала,  $c$  и  $v$  – скорость и удельный объем потока в этом сечении, то

$$M = \frac{Fc}{v} \quad (5.3)$$

Величина  $Fc$  представляет собой объем, который протекает в секунду через данное сечение канала, т.е. представляет собой секунднй объемный расход газа или пара.

При установившемся и неразрывном течении  $M = \frac{Fc}{v} = \text{const.}$

Дифференцируя это уравнение и записав его в виде  $Mv = Fc$ , получим:

$$Mdv = F dc + c dF$$

Разделив последнее уравнение на предыдущее, запишем:

$$\frac{dv}{v} = \frac{dc}{c} = \frac{dF}{F}$$

Рассматривая изэнтропный (обратимый адиабатный) процесс течения, можно написать:

$$\frac{dv}{v} = -\frac{dp}{kp}$$

Следовательно:

$$\frac{dF}{F} = -\frac{dc}{c} - \frac{dp}{kp}$$

Но из уравнения (5.2) следует, что

$$dc = \frac{-vdp}{c}$$

следовательно:

$$\frac{dF}{F} = \frac{v}{c^2} dp - \frac{1}{kp} dp$$

или

$$\frac{dF}{F} = \frac{kp v - c^2}{kpc^2} dp \quad (5.4)$$

Известно, что величина  $a = \sqrt{kp v}$  представляет собой скорость звука в том сечении канала, в котором параметры потока имеют значение  $p, v$ . Скорость  $a$  называется местной скоростью звука. Вместе с изменением параметров потока при течении по каналу изменяется и местная скорость звука вдоль канала.

При  $kp v = a^2$  можно записать:

$$\frac{dF}{F} = \frac{a^2 - c^2}{kpc^2} dp$$

$$\frac{dF}{F} = \frac{1}{kp} \left( \frac{1 - \frac{c^2}{a^2}}{\frac{c^2}{a^2}} \right) dp = \frac{1}{kp} \left( \frac{1}{M^{*2}} - 1 \right) dp \quad (5.5)$$

Отношение  $M^* = \frac{c}{a}$  называется числом Маха.

При течении по соплу давление газа или пара уменьшается ( $dp < 0$ ), скорость растет ( $dc > 0$ ). Местная скорость звука уменьшается по направлению течения. Для идеального газа  $a = \sqrt{kpv} = \sqrt{kRT}$ ; так как в изоэнтальпическом процессе течения температура газа  $T$  уменьшается, следовательно, уменьшается скорость  $a$ .

Применяя уравнение (5.5) к изоэнтальпическому течению газа или пара по соплу, можно установить: если  $a^2 - c^2 > 0$ ,  $c < a$ ,  $M^* < 1$ , то  $dF < 0$ ; если  $a^2 - c^2 < 0$ ,  $c > a$ ,  $M^* > 1$ , то  $dF > 0$ , т.е. если скорость течения газа или пара меньше местной скорости звука, то сопло суживающееся, а если больше, то сопловый канал расширяющийся.

Из изложенного видно, что если скорость рабочего тела на входе в сопло меньше местной скорости звука ( $M^* < 1$ ), а на выходе из сопла она должна быть больше скорости звука в выходном сечении ( $M^* > 1$ ), то сопло должно сначала суживаться, а затем расширяться, как это изображено на рисунке 5.2. Такое сопло называется расширяющимся соплом или соплом Лавалья.

В суживающейся части этого сопла возрастающая скорость рабочего тела меньше убывающей местной скорости звука. В самом узком сечении сопла эти скорости становятся равными друг другу и затем в расширяющейся части сопла скорость рабочего тела больше соответствующей местной скорости звука.

То обстоятельство, что в самом узком сечении сопла скорость рабочего тела и местная скорость звука одинаковы, может быть установлена и с помощью уравнения (5.5). В горле сопла  $dF = 0$ , следовательно,  $a^2 - c^2 = 0$  и  $a = c$ .

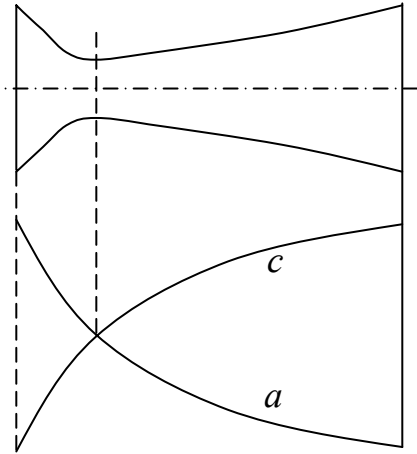


Рисунок 5.2 - Расширяющееся сопло

Из вышеизложенного следует, что при течении газа или пара по суживающемуся соплу скорость потока в его выходном сечении может быть меньше или равна скорости звука в выходном сечении. Для получения скорости истечения, большей местной скорости звука, т.е. для получения сверхзвуковых скоростей, сопло должно быть расширяющимся.

Для изоэнтропного процесса понижения давления (расширения) в соплах

$q_{0-1} = 0$ ,  $l' = 0$  и из уравнения (5.2) следует, что

$$\frac{c_1^2 - c_0^2}{2} = i_0 - i_1 \quad (5.6)$$

Отсюда скорость истечения рабочего тела через сопло:

$$c_1 = \sqrt{2(i_0 - i_1) + c_0^2} \quad (5.7)$$

Здесь  $i_0$  и  $i_1$  должны быть выражены в Дж/кг. Так как в таблицах и диаграммах обычно энтальпия дается в кДж/кг, целесообразно уравнение записать в виде  $c_1 = \sqrt{2 \cdot 1000(i_0 - i_1) + c_0^2}$ , или

$$c_1 = 44,7 \sqrt{i_0 - i_1 + \frac{c_0^2}{2000}} \quad (5.8)$$



где  $i_0$  и  $i_1$  – энтальпия газа, Дж/кг.

Ввиду того что скорость  $c_0$  на входе в сопло мала по сравнению со скоростью истечения  $c_1$ , часто принимают  $c_0 = 0$ . Тогда скорость истечения вычисляется по уравнению:

$$c_1 = 44,7\sqrt{i_0 - i_1} \quad (5.9)$$

В прежней системе единиц, используя уравнение (5.7), получим:

$$c_1 = \sqrt{\frac{2g}{A}(i_0 - i_1) + c_0^2} = \sqrt{8380(i_0 - i_1) + c_0^2}$$
$$c_1 = 91,5\sqrt{i_0 - i_1 + \frac{c_0^2}{8380}} \quad (5.10)$$

при  $c_0 = 0$

$$c = 91,5\sqrt{i_0 - i_1} \quad (5.11)$$

Разность значений энтальпии в начале и в конце изоэнтропного процесса расширения в сопле  $h_{01} = i_0 - i_1$ , согласно уравнениям (5.10) и (5.11), равна располагаемой работе между давлениями  $p_0$  и  $p_1$  и называется располагаемым перепадом энтальпий.

Для определения скорости истечения удобно пользоваться  $is$  – диаграммой. По заданным параметрам  $p_0$  и  $t_0$  на диаграмме наносится точка  $0$ , изображающая состояние рабочего тела при входе в сопло (рисунок 5.3).

Процесс изоэнтропного расширения до давления  $p_1$  на выходе из сопла изображается линией  $0-1$ . В точках  $0$  и  $1$  определяются значения энтальпии  $i_0$  и  $i_1$ , входящие в уравнения для скорости истечения. Следует обратить внимание на то, что  $p_1$  – давление на выходе из сопла, а не давление среды, куда

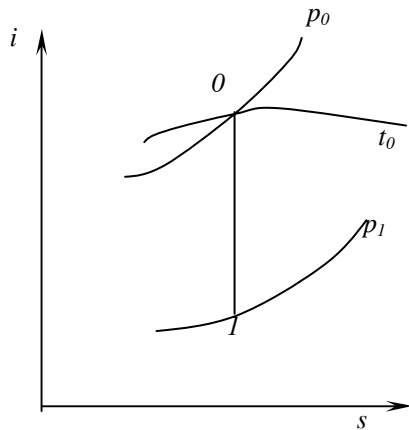


Рисунок 5.3 - Определение скорости истечения с помощью is - диаграммы

происходит истечение. Эти давления не всегда одинаковы, как будет показано ниже.

Для скорости истечения идеального газа через сопла может быть выведена и другая формула, более удобная для расчетов и необходимая для дальнейшего исследования истечения.

При изэнтропном течении идеального газа по соплу  $q_{0-1}$ ,  $l' = 0$  и

$$u_1 - u_0 = -l_{0-1} = \frac{p_0 v_0 - p_1 v_1}{k-1}.$$

Из уравнения (5.6) получаем:

$$\begin{aligned} \frac{c_1^2}{2} - \frac{c_0^2}{2} &= \frac{p_0 v_0 - p_1 v_1}{k-1} + p_0 v_0 - p_1 v_1 = (p_0 v_0 - p_1 v_1) \left( \frac{1}{k-1} + 1 \right) = \\ &= \frac{k}{k-1} (p_0 v_0 - p_1 v_1) = \frac{k}{k-1} p_0 v_0 \left( 1 - \frac{p_1 v_1}{p_0 v_0} \right) \end{aligned}$$

Но в изэнтропном процессе отношение  $p_0$  к  $p_1$  равно:

$$\frac{p_0}{p_1} = \left( \frac{v_1}{v_0} \right)^k; \quad \frac{v_1}{v_0} = \left( \frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} = \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^{-\frac{1}{k}} \quad (5.12)$$

Поэтому

$$\frac{c_1^2}{2} - \frac{c_0^2}{2} = \frac{k}{k-1} p_0 v_0 \left[ 1 - \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^{1-\frac{1}{k}} \right]$$

Отсюда скорость истечения идеального газа через сопла может быть найдена как:

$$c_1 = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_0 v_0 \left[ 1 - \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} + c_0^2 \quad (5.13)$$

При  $c_0 = 0$

$$c = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_0 v_0 \left[ 1 - \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (5.14)$$

В прежней системе единиц:

$$c = \sqrt{2g \frac{k}{k-1} p_0 v_0 \left[ 1 - \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (5.15)$$

Секундный массовый расход газа при площади выходного сечения сопла  $F_1$  из формулы (5.3) равен

$$M = \frac{F_1 c_1}{v_1} \quad (5.16)$$

Подставляя сюда значение  $c_1$  по формуле (5.14), получим:

$$M = \frac{F_1}{v_1} \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_0 v_0 \left[ 1 - \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

Заменяя  $v_1$  его значением из формулы (5.12), имеем:

$$M = \frac{F_1}{v_0 \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^{-\frac{1}{k}}} \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_0 v_0 \left[ 1 - \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

Внося под корень выражение  $\frac{1}{v_0 \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^{-\frac{1}{k}}}$  окончательно получим:

$$M = F_1 \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p_0}{v_0} \left[ \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (5.17)$$

В прежней системе единиц секундный весовой расход газа  $G$  (в кгс/с) равен

$$G = F_1 \sqrt{2g \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p_0}{v_0} \left[ \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (5.18)$$

Уравнения (5.12) – (5.18) для идеального газа могут быть применены и к реальному газу и пару, если адиабатный процесс для них подчиняется уравнению  $p v^k = \text{const}$ .

Из уравнения (5.17) видно, что для данного газа или пара (имеющего определенное значение  $k$ ) при заданном начальном состоянии его и при известном  $F_1$  секундный расход  $M$  зависит только от отношения  $\frac{p_1}{p_0}$ . Чтобы выяснить, когда  $M$  достигнет максимума, следует взять производную от  $M$  и, приравняв ее нулю, найти то отношение  $\frac{p_1}{p_0}$ , при котором  $M = M_{\text{max}}$ . Но при

заданных параметрах начального состояния рабочего тела и заданных  $F_l$  и  $k$  взятие производной от  $M$  равносильно взятию производной от квадратных скобок под знаком радикала уравнения (16).

Итак, для того, чтобы  $M = M_{\max}$ , необходимо:

$$\left[ \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right] = 0$$

или

$$\frac{2}{k} \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{2}{k}-1} - \frac{k+1}{k} \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{k+1}{k}-1} = 0$$

т.е.

$$\frac{2}{k} \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{2-k}{k}} - \frac{k+1}{k} \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{1}{k}} = 0$$

Перенеся выражение со знаком минус в правую часть и разделив обе части уравнения на его левую часть, получим:

$$1 = \frac{k+1}{2} \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

Отсюда

$$\frac{p_1}{p_0} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (5.19)$$

Чтобы убедиться в том, что при найденном значении отношения  $\frac{p_1}{p_0}$  действительно  $M = M_{\max}$ , необходимо взять вторую производную от  $M$  и подставить в нее это значение  $\frac{p_1}{p_0}$ . Если вторая производная окажется отрица-

тельной, то  $M$  имеет максимум при  $\frac{p_1}{p_0}$ , определяемом уравнением (5.19).

Проверка показывает, что вторая производная отрицательна.

Подставляя в формулу (5.17) значение  $\frac{p_1}{p_0}$  по формуле (5.19), находим:

$$\begin{aligned}
 M_{\max} &= F_1 \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p_0}{v_0} \left\{ \left[ \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \right]^{\frac{2}{k}} - \left[ \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \right]^{\frac{k+1}{k}} \right\}} = \\
 &= F_1 \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p_0}{v_0} \left[ \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} - \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \right]} = \\
 &= F_1 \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p_0}{v_0} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \left( 1 - \frac{2}{k+1} \right)}; \\
 M_{\max} &= F_1 \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \cdot \frac{p_0}{v_0} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}}
 \end{aligned} \tag{5.20}$$

Отсюда максимальный секундный весовой расход:

$$G_{\max} = F_1 \sqrt{2g \frac{k}{k+1} \cdot \frac{p_0}{v_0} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}} \tag{5.21}$$

При экспериментальном исследовании истечение газов из суживающегося сопла обнаружено, что невозможно получить давление газа в выходном сечении сопла ниже некоторого критического давления. Этому критическому давлению соответствует максимальный расход газа через сопло. Отношение критического давления к начальному давлению на входе в сопло может быть определено по формуле:

$$\frac{p_k}{p_1} = \beta_k = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (5.22)$$

Это означает, что критическое отношение давлений зависит только от рода газа и для конкретного газа является постоянным.

Для двухатомных газов и воздуха  $k = 1,4$  и  $\beta_k = 0,528$ . Для одноатомных газов  $k = 1,66$  и  $\beta_k = 0,489$ . Для трех- и многоатомных газов  $k = 1,13$  и  $\beta_k = 0,546$ .

### **Описание экспериментальной установки**

Рабочий участок установки представляет из себя трубку, в которой установлено исследуемое сужающееся сопло с выходным диаметром принятым  $d = (1,5 \pm 0,05)$  мм. Поток газа (воздух, углекислый газ  $\text{CO}_2$  или гелий He) через сопло создается с помощью компрессора. Давление газа на входе равно атмосферному ( $p_1 = B$ ). Расход газа  $G$  и скорость истечения  $w$  регулируется вентилем. Рабочие режимы определяются величиной разрежения за соплом  $\Delta p_3$ , которая регистрируется на цифровом индикаторе пульта управления.

Расход газа измеряется с помощью мерной шайбы диаметром  $d_{\text{ш}} = (5 \pm 0,1)$  мм. Перепад давления на шайбе  $\Delta H$  регистрируется на цифровом индикаторе блока расхода на пульте управления. В опытах также регистрируется на индикаторе пульта управления  $\Delta p_2$  в выходном сечении сопла. Класс точности всех приборов принимается равным 1,0. Коэффициент расхода мерной шайбы  $\mu_{\text{ш}} = 0,95$  (определен тарировкой).

## Порядок проведения эксперимента

После включения экспериментальной установки в сеть осуществляется движения газа на рабочем участке, рабочий режим устанавливается с помощью положения регулировочного вентиля и индикацией показаний измерительных приборов ( $\Delta H$ ,  $\Delta p_2$ ,  $\Delta p_3$ ).

До начала эксперимента течение газа отсутствует. Регулировочный вентиль полностью закрыт, и все приборы показывают «нуль» ( $\Delta H=0$ ,  $\Delta p_2=0$ ,  $\Delta p_3=0$ ).

После включения тумблеров питания измерительных приборов приступают к проведению опыта. Включается тумблер компрессора. При этом создается поток газа за вентилем. Постепенным открытием вентиля с помощью рукоятки на пульте управления устанавливается минимальное значение давления  $\Delta p_3 = 0,1$  атм (1-ый режим). При этом начинается течение газа и на щитовых индикаторах на пульте управления, высвечиваются численные значения величин ( $\Delta H$ ,  $\Delta p_2$ ,  $\Delta p_3$ ), которые заносятся в протокол эксперимента (таблица 5.1).

Последующие режимы принимаются при значениях  $\Delta p_3 = 0,2$  атм и далее от 0,3 до 0,9 атм.

Результаты измерений  $\Delta H$ ,  $\Delta p_2$ ,  $\Delta p_3$  заносятся в протокол испытаний.

1. Определяется действительная скорость газа в выходном сечении сопла

$$W_g = \frac{G_g R T_2}{F_C \cdot R_2} \text{ или } W_g = \sqrt{2C_p (T_1 - T_2)}$$



Таблица 5.1- Протокол эксперимента и результаты обработки данных при:

$t = \text{---}^{\circ}\text{C}$ ,

$p_1 = B = \text{---}\text{Па}$

| Газ | Номер режима | Измерения           |                     |                  | Расчет                 |                        |         |                          |                          |         |            |              |              |             |
|-----|--------------|---------------------|---------------------|------------------|------------------------|------------------------|---------|--------------------------|--------------------------|---------|------------|--------------|--------------|-------------|
|     |              | $\Delta p_3$<br>атм | $\Delta p_2$<br>атм | $\Delta H$<br>Па | $p_3 \cdot 10^5$<br>Па | $p_2 \cdot 10^5$<br>Па | $\beta$ | $G_g \cdot 10^3$<br>кг/с | $G_T \cdot 10^3$<br>кг/с | $\mu_c$ | $T_c$<br>К | $w_g$<br>м/с | $w_T$<br>м/с | $p_2 / p_1$ |
|     | 1            | 0,1                 |                     |                  |                        |                        |         |                          |                          |         |            |              |              |             |
|     | 2            | 0,2                 |                     |                  |                        |                        |         |                          |                          |         |            |              |              |             |
|     | .            | .                   |                     |                  |                        |                        |         |                          |                          |         |            |              |              |             |
|     | .            | 0,9                 |                     |                  |                        |                        |         |                          |                          |         |            |              |              |             |
|     | .            | .                   |                     |                  |                        |                        |         |                          |                          |         |            |              |              |             |



Действительная температура  $T_2$  в выходном сечении сопла находится по выражению:

$$\sqrt{2C_p(T_1 - T_2)} = \frac{G_g RT_2}{P_2}$$

откуда

$$T_2 = -A^2 \pm A\sqrt{A^2 + 2T_1}$$

где

$$A = \sqrt{C \frac{F_c}{G_g} \frac{p_2}{R}}$$

$$C_p = \frac{k}{k-1} R ; F_c = \frac{\pi d_c^2}{4} ; d_c = (1,5 \pm 0,05) \text{мм}$$

Находится теоретическая скорость истечения:

- при  $\beta > \beta_k$

$$w_T = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} RT_1 \left[ 1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

- при  $\beta < \beta_k$

$$w_T = w_K = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} RT_1}$$

2. Строятся графики зависимости  $w_g = f(\beta)$  и  $G_g = f(\beta)$ , а также  $p_2 / p_1 = f(\beta)$ , по которым находится критическое отношение давления  $\beta_k$  по опытным данным. Найденное значение  $\beta_k$  сравнивается с расчетным.

Теоретическое значение скорости  $w_T$  и расхода газа  $G_T$  могут быть также рассчитаны с помощью i-s или T-S – диаграмм состояния.

## Оценка погрешностей результатов исследования

При обработке результатов эксперимента на лабораторной установке для каждого режима истечения необходимо учитывать класс применяемого измерительного прибора и его допустимые погрешности измерений в соответствии с метрологическими требованиями.

При выполнении работы на каждом заданном режиме проводятся многократные измерения расхода, давления и температуры. Порядок расчета при оценке погрешностей рекомендуется следующий.

Определяется класс точности измерительного прибора и оценивается погрешность измерения величины в выбранном диапазоне измерений. Предел допускаемой основной погрешности средства измерения оценивается по формуле:

$$\delta = \gamma \frac{X_H}{100}$$

где  $X_H$  – нормируемое значение измеряемой или определяемой физической величины;

$\gamma$  – предел допускаемой погрешности прибора (класс точности прибора).

Определяется предел допустимой погрешности измерения перепада давления  $\Delta H$  :

$$\frac{\Delta(\Delta H)}{\Delta H} = \pm \frac{1}{100} \left[ 1,0 + \left( \frac{\Delta H_K}{\Delta H_x} - 1 \right) \right]$$

где  $\Delta H_K$  – предел измерения перепада давления;

$\Delta H_x$  – показания прибора.

Погрешность измерения температуры, барометрического давления и коэффициента расхода сопла принимается равным 2 %.

Предельные отклонения диаметра шайбы и диаметра сопла определяются допусками на их изготовление.

Относительная среднеквадратическая погрешность косвенного измерения действительного расхода газа определяется по формуле:

$$\frac{\Delta Gg}{Gg} \cdot 100 = \pm 100 \left[ \left( \frac{\Delta \mu_{III}}{\mu_{III}} \right)^2 + \left( \frac{2\Delta d_{III}}{d_{III}} \right)^2 + \left( \frac{\Delta B}{2B} \right)^2 + \left( \frac{\Delta T_1}{2T} \right)^2 + \left( \frac{\Delta(\Delta H)}{2\Delta H} \right)^2 \right]^{1/2}$$

### Контрольные вопросы

1. Почему истечение газа из сопла можно считать адиабатным?
2. Какие режимы истечения из сопла Вам известны?
3. От каких параметров зависит  $\beta_k$ ?
4. От каких параметров зависит скорость истечения через суживающееся сопло в сверхкритической области истечения?
5. Измерение каких параметров производится в опыте?
6. Что необходимо сделать, чтобы увеличить расход газа при истечении через сужающееся сопло неизменной геометрии в сверхкритической области истечения?
7. С помощью какого устройства создается перепад давления в данной установке?
8. Как определяется действительная температура на выходе из сопла  $T_2$ ?
9. Как осуществляется переход с одного режима на другой?
10. Какие параметры влияют на значение коэффициента расхода сопла  $\mu_c$ ?
11. Приведите вывод уравнения адиабаты.

## 6 Лабораторная работа № 6

### «Исследование процессов во влажном воздухе»

*Цель работы: изучение процессов изменения состояния влажного воздуха, приобретение навыков измерения влажности с помощью аспирационного психрометра и I-d диаграммы*

В атмосферном воздухе всегда есть влага в виде водяного пара. Смесь сухого воздуха с водяным паром называется влажным воздухом. Водяной пар в воздухе может быть в насыщенном или перегретом состоянии. Соответственно этому влажный воздух бывает:

- насыщенным влажным воздухом – смесь сухого воздуха с насыщенным водяным паром;
- ненасыщенным влажным воздухом – смесь сухого воздуха с перегретым водяным паром.

Температура, до которой необходимо охладить ненасыщенный влажный воздух, чтобы он стал насыщенным, называется температурой точки росы. При дальнейшем охлаждении влажного воздуха происходит конденсация пара.

Давление влажного воздуха определяется в виде суммы парциальных давлений воздуха и водяного пара (закон Дальтона):

$$p = p_v + p_n \quad (6.1)$$

Абсолютной влажностью называется масса пара, содержащегося в 1 м<sup>3</sup> влажного воздуха. Так как влажный воздух представляет собой газовую смесь, то объём пара в смеси равен объёму всей смеси (закон Амага). Следо-

вательно, абсолютная влажность может быть выражена через плотность пара  $\rho_{\Pi}$  в смеси при своём парциальном давлении  $p_{\Pi}$ :

$$c_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{V_{\Pi}} = \frac{M_{\Pi}}{V_{\text{см}}} \quad (6.2)$$

где  $M_{\Pi}$  – масса пара.

Для нахождения состояния влажного воздуха в части его насыщенности влагой пользуются понятием влагосодержания. Под влагосодержанием  $d$  понимается величина отношения массы пара, содержащегося во влажном воздухе, к массе сухого воздуха, [кг/кг] или [г/кг]:

$$d = \frac{M_{\Pi}}{M_{\text{В}}} = \frac{c_{\Pi}}{c_{\text{В}}} \quad (6.3)$$

Влагосодержание можно выразить через парциальное давление пара  $p_{\Pi}$  и давление влажного воздуха  $p$ . Для этого воспользуемся уравнениями состояния для сухого воздуха и водяного пара и отнесем их к единице объема влажного воздуха:

$$\begin{aligned} p_{\text{В}} V &= M_{\text{В}} R_{\text{В}} T \\ p_{\Pi} V &= M_{\Pi} R_{\Pi} T \end{aligned}$$

Разделив почленно первое уравнение на второе, получим:

$$\frac{p_{\text{В}}}{p_{\Pi}} = \frac{M_{\text{В}} R_{\text{В}}}{M_{\Pi} R_{\Pi}} = \frac{287,04 M_{\text{В}}}{461,6 M_{\Pi}} = \frac{0,622}{d}$$

Учитывая, что  $p_{\text{В}} = p - p_{\Pi}$ , находим:

$$d = 0,622 \frac{p_{\Pi}}{p - p_{\Pi}} \quad (6.4)$$

Кроме абсолютной влажности и влагосодержания применяют ещё понятие относительной влажности. Относительной влажностью  $\varphi$  называется отношение действительной абсолютной влажности ненасыщенного воздуха к максимально возможной абсолютной влажности воздуха при той же температуре:

$$\varphi = \frac{c_{\text{п}}}{c_{\text{max}}} \quad (6.5)$$

Относительная влажность изменяется в пределах от  $\varphi = 0$  (сухой воздух) до  $\varphi = 1$  (воздух, насыщенный влагой).

Воспользовавшись уравнением состояния  $p_{\text{п}} = R_{\text{п}} \rho_{\text{п}} T$  и  $p_{\text{max}} = R_{\text{п}} \rho_{\text{max}} T$  получим:

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{max}}} \quad (6.6)$$

Отсюда, если влажный воздух считать идеальным газом, то относительная влажность равна отношению парциального давления водяного пара в нём к максимально возможному давлению водяного пара при данной температуре.

Относительная влажность и влагосодержание влажного воздуха могут быть определены с помощью прибора, называемого психрометром. Существует несколько типов психрометров: стационарные, аспирационные, дистанционные, самопишущие и др.

В данной работе используется аспирационный психрометр, общий вид которого показан на рисунке 6.1. Он состоит из двух ртутных термометров – сухого и смоченного. Смоченный термометр отличается от сухого тем, что его термоприёмник (резервуар со ртутью) обернут батистом и в процессе измерения поддерживается увлажнённым. Оба термометра 1 заключены в металлическую оправу, их резервуары помещены в трубки 2, соединённые с вентилятором 3. Вентилятор приводится во вращение пружинным механиз-



мом или электродвигателем и обеспечивает постоянный поток воздуха в районе резервуаров со скоростью 2 м/с. Для защиты от нагревания солнечными лучами все металлические части прибора никелированы.

Если влажный воздух, окружающий термометры, будет ненасыщенным, то с поверхности материи смоченного термометра будет испаряться вода и он покажет более низкую температуру  $t_m$ , чем температура сухого термометра  $t_c$ . Зная разность  $t_c - t_m$ , по психрометрическим таблицам можно определить ряд характеристик влажного воздуха (относительную влажность, влагосодержание, точку росы и др.).

Для определения параметров влажного воздуха может быть использована *id*- диаграмма, предложенная профессором Л.К. Рамзиным в 1918 году (рисунок 6.2). При создании этой диаграммы использовано уравнение, связывающее энтальпию  $I$ , температуру  $t$  и влагосодержание  $d$  влажного воздуха.

Диаграмма строится в косоугольной системе координат. На этой диаграмме вертикальные линии – линии влагосодержания  $d$  (г/кг); линии, проведённые под углом  $135^\circ$  к вертикальным, являются линиями постоянных значений энтальпии. Кроме того, на диаграмме имеются линии постоянных температур влажного воздуха, кривые относительной влажности  $\phi$  воздуха, кривая парциальных давлений  $p_n = f(d)$ . Диаграмма обычно строится для какого-либо среднего барометрического давления.

По *Id*- диаграмме, зная температуру  $t$  и относительную влажность  $\phi$ , можно определить энтальпию  $I$ , влагосодержание  $d$  и парциальное давление  $p_n$ . По температурам сухого и смоченного термометров можно определить

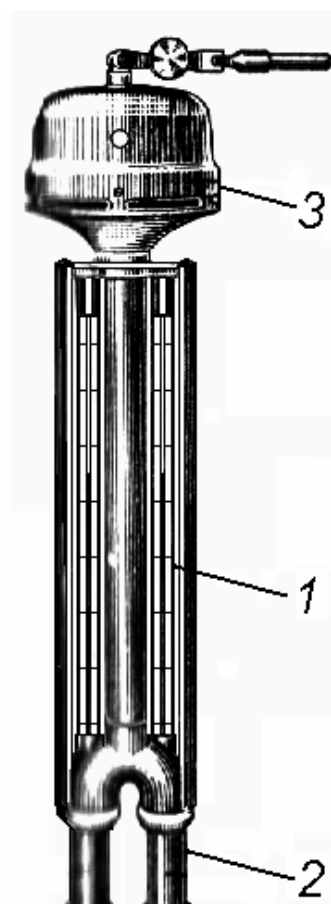


Рисунок 6.1- Аспирационный психрометр

относительную влажность воздуха. При этом температура смоченного термометра принимается за точку росы (точка С), от которой проводится линия СМ постоянной энтальпии до пересечения с линией температуры сухого термометра в точке М. Положение последней между кривыми  $\phi = const$  и определяет относительную влажность воздуха  $\phi$ .

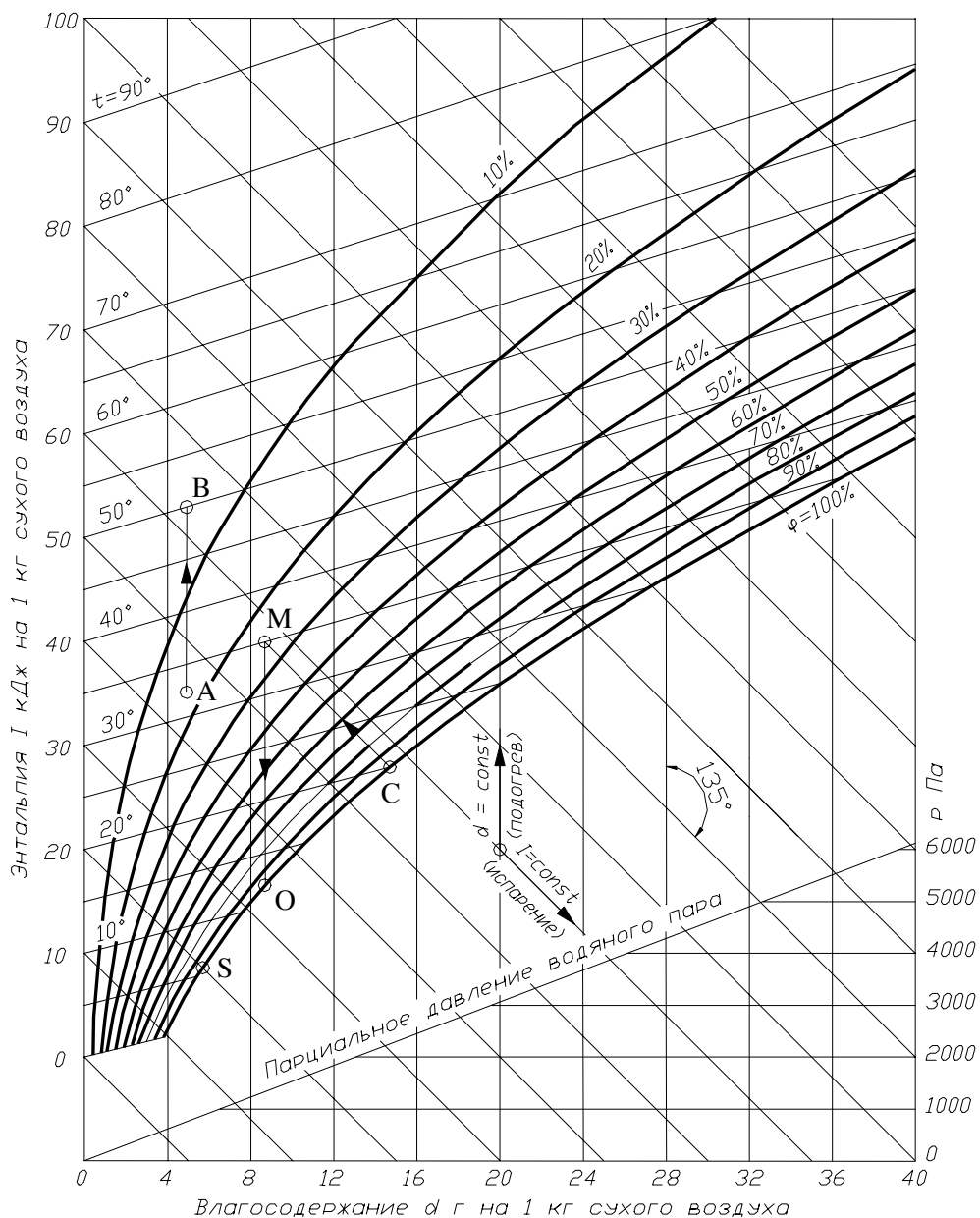


Рисунок 6.2  $Id$ -диаграмма влажного воздуха при  $p = 760$  мм рт.ст. (101325 Па).

Процесс нагрева влажного воздуха на *id*- диаграмме изображается вертикальной прямой линией (линия АВ) при  $d=const$ . Процесс охлаждения также протекает при  $d=const$  и изображается вертикальной прямой (линия МО). Этот процесс справедлив только до состояния полного насыщения ( $\varphi = 100\%$ ). При дальнейшем охлаждении воздух будет пересыщен влагой и она будет выпадать в виде росы. Процесс конденсации условно можно считать проходящим по линии  $\varphi = 100\%$ , например, от точки О до точки S. Количество образовавшейся воды будет равно разности влагосодержания в этих точках.

Температура точки росы с помощью *id*-диаграммы находится следующим образом. Из точки, характеризующей данное состояние влажного воздуха, проводится вертикаль до пересечения с линией  $\varphi = 100\%$ . Изотерма, проходящая через эту точку пересечения, и будет определять точку росы.

### **Описание экспериментальной установки**

Схема лабораторной установки приведена на рисунке 6.3. Лабораторная установка состоит из климатической камеры 1, в которой находится электрический нагреватель 3. На нагревателе устанавливается увлажнитель 2, представляющий собой открытый сосуд с водой. Для определения влажности воздуха используется аспирационный психрометр, который может быть подвешен в камере на специальном крючке. Для вентилирования камеры служит электровентилятор 5. Вентилятор и нагреватель питаются от сети переменного тока напряжением 220 В.

### **Подготовка установки к работе**

Перед началом работы лабораторная установка приводится в исходное состояние:

- камера 1 сообщается с атмосферой лаборатории и термостатируется;

- в стакан 2 заливается примерно 50 мл водопроводной воды;
- нагреватель 3 и вентилятор 5 отключены от сети.

### Порядок проведения эксперимента

1. Привести психрометр в рабочее состояние (смочить батист мокрого термометра водой, взвести пружину вентилятора) и измерить начальные параметры воздуха в камере, т.е. зарегистрировать  $t_c$  и  $t_m$ .

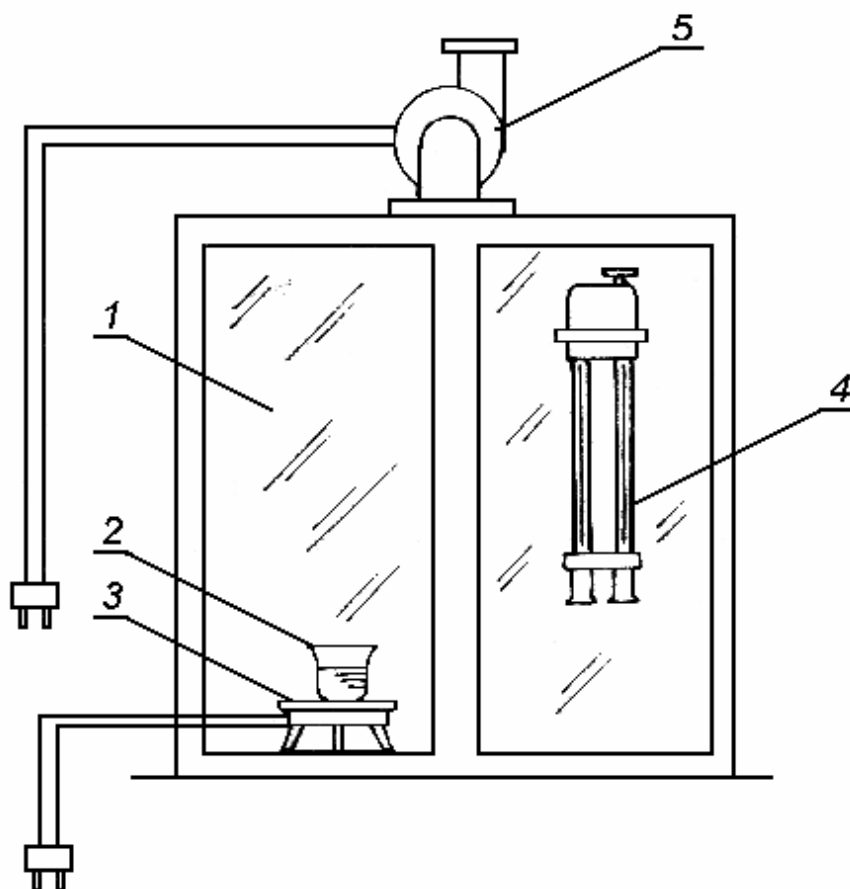


Рисунок 6.3 - Схема лабораторной установки

2. Снять стакан 2 с нагревателя 3, оставив его в камере. Закрыть дверки камеры и включить нагреватель. Через 10 минут после включения внести в камеру психрометр с работающим вентилятором и смоченным водой батистом мокрого термометра. Через 2 минуты выполнить по психрометру 3 измерения с интервалом 30 секунд.

3. Извлечь психрометр из камеры и установить на нагреватель 3 стакан с водой 2. Через 3 минуты после начала кипения воды внести в камеру подготовленный психрометр и через 2 минуты выполнить 3 измерения с интервалом 30 секунд.

4. Отключить питание нагревателя 3, снять с него стакан 2 и включить вентилятор 5 при закрытых дверцах камеры 1. Через 3 минуты внести в неё психрометр и через 2 минуты выполнить 3 измерения с интервалом 30 секунд.

5. Открыть дверцы камеры. Через 5 минут выключить вентилятор и измерить конечное состояние параметров воздуха.

### **Обработка результатов эксперимента**

Результаты измерения в опытах 2 - 4 усредняются. С помощью *id*- диаграммы для опытов 1 - 5 определяется: относительная влажность, энтальпия, влагосодержание и парциальное давление водяного пара во влажном воздухе. В масштабе в косоугольной системе координат с осями *i-d* вычерчиваются процессы изменения состояния влажного воздуха: при подогреве без увлажнения (опыты 1 и 2), при подогреве с увлажнением (опыты 2 и 3), при работе вытяжной вентиляции с закрытыми дверцами (опыты 3 и 4), при работе вентилятора с открытыми дверцами (опыты 4 и 5).

Производится сравнение реальных процессов с теоретическими и анализируются причины их различия.

Отчёт по лабораторной работе должен содержать: цель работы; краткие теоретические положения; описание и схему установки; обработку результатов опытов (приводятся определённые по диаграмме значения  $\phi$ ,  $I$ ,  $d$ ,  $p_p$ ); графики изменения состояния влажного воздуха в осях *i-d*; анализ полученных результатов.

Таблица 6.1 – Опыт № 1

| Измеряемая величина                                  | Значение |
|------------------------------------------------------|----------|
| Температура сухого термометра $t_c, ^\circ\text{C}$  |          |
| Температура мокрого термометра $t_m, ^\circ\text{C}$ |          |

Таблица 6.2 - Опыт № 2

| Измеряемая величина                                  | № измерения |   |   | Среднее значение |
|------------------------------------------------------|-------------|---|---|------------------|
|                                                      | 1           | 2 | 3 |                  |
| Температура сухого термометра $t_c, ^\circ\text{C}$  |             |   |   |                  |
| Температура мокрого термометра $t_m, ^\circ\text{C}$ |             |   |   |                  |

Таблица 6.3 - Опыт № 3

| Измеряемая величина                                  | № измерения |   |   | Среднее значение |
|------------------------------------------------------|-------------|---|---|------------------|
|                                                      | 1           | 2 | 3 |                  |
| Температура сухого термометра $t_c, ^\circ\text{C}$  |             |   |   |                  |
| Температура мокрого термометра $t_m, ^\circ\text{C}$ |             |   |   |                  |

Таблица 6.4 - Опыт № 4

| Измеряемая величина                                  | № измерения |   |   | Среднее значение |
|------------------------------------------------------|-------------|---|---|------------------|
|                                                      | 1           | 2 | 3 |                  |
| Температура сухого термометра $t_c, ^\circ\text{C}$  |             |   |   |                  |
| Температура мокрого термометра $t_m, ^\circ\text{C}$ |             |   |   |                  |

Таблица 6.5- Опыт № 5

| Измеряемая величина                                  | Значение |
|------------------------------------------------------|----------|
| Температура сухого термометра $t_c, ^\circ\text{C}$  |          |
| Температура мокрого термометра $t_m, ^\circ\text{C}$ |          |

## Контрольные вопросы

1. В каких состояниях может находиться влажный воздух? Чем это объясняется?
2. Основные параметры влажного воздуха. Их размерность.
3. Дать формулировку абсолютной влажности воздуха. Аналитическое определение абсолютной влажности.
4. Дать формулировку относительной влажности. Как она определяется аналитически и по *id*-диаграмме влажного воздуха?
5. Дать формулировку температуры точки росы. Как она определяется по *id*-диаграмме влажного воздуха?
6. Ход основных линий *id*-диаграммы влажного воздуха.
7. Дать формулировку влагосодержания влажного воздуха. Как его можно определить аналитически?
8. Какие процессы происходят с воздухом в лабораторной установке и в каких элементах этой установки? Как эти процессы изображаются в *id*-диаграмме влажного воздуха?

## 7 Лабораторная работа № 7

### «Определение зависимости температуры от давления для насыщенного пара методом кипения»

*Цель работы: ознакомление с одним из возможных методов определения зависимости температуры от давления для насыщенного пара. Определить зависимость между давлением и температурой насыщенного пара для воды и водяного пара при постоянном объеме.*

Экспериментальное исследование свойств водяного пара имеет большое значение для составления таблиц термодинамических свойств воды и водяного пара, столь широко применяемых при расчете различных тепловых аппаратов. Это объясняется важностью зависимости  $p$  от  $t$  при технических расчетах: численные значения температур насыщения непосредственно входят в таблицы водяного пара и, кроме того, могут служить для расчета энтальпий насыщенного пара и других параметров.

Лабораторная работа позволяет установить зависимость температуры кипения воды от давления насыщенного пара (до давления  $4 \text{ кгс/см}^2$  с точностью до 3 %).

Опытным путем установлено, что каждому давлению соответствует определенная температура кипения жидкости, являющаяся температурой насыщения. С повышением давления возрастает температура кипения.

В общем виде связь между температурой насыщения  $t_n$  и давлением  $p_n$  выражается уравнением:

$$t_n = f(p_n) \quad (7.1)$$

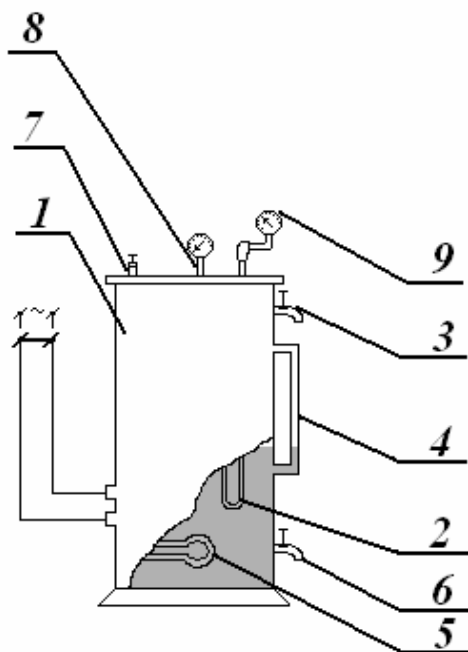
которое действительно только для области насыщения.

### Описание экспериментальной установки

Установка для изохорного процесса изменения состояния воды и водяного пара состоит из толстостенного сосуда 1. Внутри сосуда имеется элек-



ронагреватель 6, сообщающий тепло воде. В крышку сосуда вварена гильза 2, в которую вставлена хромель-копелевая термопара. В крышке сосуда имеется предохранительный клапан 7. Давление в сосуде измеряется манометром 8.



1 – толстостенный сосуд; 2 – гильза; 3 и 5 – краны; 4 – водомерное стекло; 6 – электронагреватель; 7 – предохранительный клапан; 8 – манометр; 9 – милливольтметр

Рисунок 7.1 - Схема установки для определения зависимости температуры от давления насыщенного водяного пара.

ТермоЭДС хромель-копелевой термопары снимается потенциометром типа КСП-4. Уровень воды в сосуде фиксируется водомерным стеклом 4. Для заполнения и слива воды на стенке сосуда имеются краны 3 и 5.

Измерение температуры и давления в сосуде проводится при равновесном состоянии.

### **Порядок проведения эксперимента**

Проведение опыта на установке состоит в измерении давления и температуры в сосуде. Перед опытом необходимо проверить, заполнен ли сосуд водой. В начале опыта следует:

1. Открыть кран 3
2. Включить электронагреватель установки в электрическую сеть.
3. После того, как вода в сосуде закипит, что можно обнаружить по интенсивному выходу пара через открытый кран 3 и показания потенциометра 9 ( $t \approx 100$  °С), кран 3 следует закрыть и начать наблюдения.
4. Запись давления проводить через каждые 0,1 – 0,5 атм., одновременно снимая и записывая показания потенциометра.
5. Продолжить запись наблюдений до давления 1,5 кгс/см<sup>2</sup>, после достижения которого отключить электронагреватель и включить вентилятор для более интенсивного охлаждения сосуда 1.
6. Регистрацию показаний манометра и потенциометра продолжать при охлаждении для тех же давлений, что и при нагревании.
7. Определить атмосферное давление В по барометру.
8. После окончания опыта оформить журнал наблюдений (таблица 7.1).

Таблица 7.1 – Результаты наблюдений и расчетов

| № наблюдения | Давление, кгс/см <sup>2</sup> |       |                | Температура, $t_n$ °С |                |         |             | Относительная ошибка, % |
|--------------|-------------------------------|-------|----------------|-----------------------|----------------|---------|-------------|-------------------------|
|              | В                             | $p_M$ | $p_{AB} = p_H$ | при нагревании        | при охлаждении | средняя | По таблицам |                         |
| 1            | 2                             | 3     | 4              | 5                     | 6              | 7       | 8           | 9                       |
|              |                               |       |                |                       |                |         |             |                         |

### Обработка результатов эксперимента

В результате эксперимента должны быть получены:

1. Численные значения абсолютного давления в сосуде – давления насыщения, кгс/см<sup>2</sup>:

$$p_H = p_A = B + p_M \quad (7.2)$$

2. Определены средние температуры насыщения при нагревании и охлаждении:

$$t_n = \frac{t_{нагр} + t_{охл}}{2} \quad (7.3)$$

3. По результатам опытных данных после их обработки должен быть построена зависимость  $t_H = f(p_H)$  в координатах  $p$ -  $t$ .

4. По результатам полученных данных и табличным значениям /2/ необходимо подсчитать относительную ошибку в процентах:

$$\Delta t = \frac{t_H^T - t_H}{t_H^T} \quad (7.4)$$

#### Отчет о работе

В отчет о работе включить:

1. Принципиальную схему установки и краткое описание работы.
2. Журнал наблюдений.
3. Расчет величин абсолютного давления и средних температур.
4. Расчет относительных ошибок.
5. График процесса в координатах  $p$ - $t$ .
6. Анализ результатов исследования.

#### Контрольные вопросы

1. Виды давления и соотношения между ними.
2. Что такое температура насыщения? Как она зависит от давления?
3. Что такое степень сухости водяного пара? Диапазон изменения и размерность.
4. В каких состояниях может находиться водяной пар, в чем различие этих состояний и в чем сходство?
5. Определение параметров влажного насыщенного пара.
6.  $pt$ -диаграмма для водяного пара. Ход основных линий на этой диаграмме.
7. Свойства  $pt$ -диаграммы

## **8 Литература, рекомендуемая для изучения курса**

### **«Термодинамика»**

1. Теплотехника: учебник для вузов / под общ. ред. В.Н. Луканина - М.: Высшая школа, 2008.- 671 с.
2. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача / В.В. Нащокин - М.: Высшая школа, 1980.-469 с.
3. Алексеев Г.Н. Общая теплотехника / Г.Н. Алексеев - М.: Высшая школа, 1980.-552 с.
4. Теплотехника: учебник для вузов / под общ. ред. А.М. Архарова, В.Н. Афанасьева.- М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.- 712 с.
5. Ларииков Н.Н. Теплотехника / Н.Н. Ларииков - М.: Изд-во Стройиздат, 1985.-432 с.
6. Лабораторный практикум по термодинамике и теплопередаче / под общ. ред. В.И. Крутова и Е.Б. Шишова. -М.: Высшая школа,1988.-216с.
7. Теплофизические измерения и приборы / Платунов Е.С. [и др.]; под общ. ред. Е.С. Платунова – Л.: Изд-во Машиностроение, 1986.- 256с.
8. Кириллин В.А. Исследования термодинамических свойств веществ / В.А. Кириллин, А.Е. Шейндлин. – М.: Изд-во Энергоиздат, 1963.-560с.
9. Вукалович М.П. Термодинамические свойства воды и водяного пара/ М.П. Вукалович.- М.: Изд-во Энергоиздат, 1958.- 128с.
- 10.Сборник задач по технической термодинамике / Т.Н. Андрианова, Б.В. Дзампов, В.Н. Зубарев, С.А. Ремизов.- М.: Изд-во Энергоиздат, 1981.- 240 с.