

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и экология»

**А. В. Овсянник, М. Н. Новиков, Д. С. Трошев**

## **ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА**

### **ПРАКТИКУМ**

**по одноименному курсу для студентов специальностей  
1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика»  
и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация  
энергооборудования организаций»  
дневной и заочной форм обучения**

**Электронный аналог печатного издания**

**Гомель 2016**

УДК 621.1.016.7(075.8)  
ББК 31.311я73  
О-34

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом  
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 5 от 27.01.2015 г.)*

Рецензент: зав. каф. «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого  
канд. техн. наук *А. О. Добродей*

**Овсянник, А. В.**

О-34 Техническая термодинамика : практикум по одноим. курсу для студентов специальностей 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» днев. и заоч. форм обучения / А. В. Овсянник, М. Н. Новиков, Д. С. Трошев. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. – 69 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц; 32 Mb RAM; свободное место на HDD 16 Mb; Windows 98 и выше; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-535-325-7.

Содержит материал для закрепления теоретических знаний по основным разделам дисциплины, проверки основных положений теории, а также для проведения экспериментальных измерений, обработки и анализа полученных данных.

Для студентов специальностей 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» дневной и заочной форм обучения.

**УДК 621.1.016.7(075.8)  
ББК 31.311я73**

**ISBN 978-985-535-325-7**

© Овсянник А. В., Новиков М. Н.,  
Трошев Д. С., 2016  
© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2016

## *Лабораторная работа № 1*

# МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ

**Цель работы:** изучить методы измерения; ознакомиться с приборами для измерения температуры и давления; произвести измерения температуры и давления; рассчитать давление в различных единицах измерения.

### Теоретическая часть

**Измерением** называется определение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.

Измерения физических величин делятся на промышленные (технические) и лабораторные.

**Промышленные** измерения имеют сравнительно невысокую точность, достаточную для практических целей, и производятся приборами, устройство которых отвечает их назначению и условиям работы.

**Лабораторные измерения** отличаются высокой точностью благодаря применению более совершенных методов и приборов и учету возможных погрешностей. Этот вид измерений производится при выполнении научно-исследовательских, наладочных и поверочных работ.

Для определения значений измеряемой величины служат прямые и косвенные измерения.

**Прямые измерения** заключаются в непосредственном сравнении измеряемой величины с единицей измерения при помощи меры или измерительного прибора со шкалой, выраженной в этих единицах. Так, например, к прямым относятся измерения длины – метром, давления – манометром, температуры – термометром и т. д. Благодаря наглядности и простоте прямые измерения получили в технике большое распространение.

**Косвенные измерения** предусматривают определение искомой величины не непосредственно, а путем прямого измерения одной или нескольких других величин, с которыми она связана функциональной зависимостью. Примерами косвенного измерения служат: определение расхода вещества по перепаду давления в сужающем устройстве, количества воды в баке по уровню в указательном стекле.

**Методом измерений** называется совокупность приемов использования принципов и средств измерений. Существует ряд методов из-

мерений, из которых наиболее распространенными являются: метод непосредственной оценки, метод сравнения с мерой и нулевой метод.

*Метод непосредственной оценки* предусматривает определение искомой величины по отсчетному устройству измерительного прибора, например, по положению указательной стрелки манометра относительно его шкалы.

Метод сравнения с мерой состоит в том, что измеряемая величина сравнивается со значением, воспроизводимым мерой для данной величины, например, при измерении длины калиброванным метром.

Нулевой метод является разновидностью метода сравнения с мерой. Здесь результирующее воздействие двух величин (измеряемой и воспроизводимой мерой), направленных навстречу друг другу, доводится до нуля. Примером может служить измерение массы вещества на рычажных весах с уравниванием ее калиброванными грузами.

**Температурой** называют физическую величину, характеризующую степень нагретости тела. Измерить температуру можно только косвенным путем, основываясь на зависимости от температуры таких физических термометрических свойств тел, которые поддаются непосредственному измерению (длина, объем, плотность и т. д.). Средство измерений температуры называют термометром.

Классификация средств измерений температуры в зависимости от используемого термометрического свойства тел и диапазона измерений:

*Термометры расширения* – основаны на свойстве тел изменять под действием температуры свой объем (–190–650).

*Манометрические термометры* – работают по принципу изменения давления жидкости, газа или пара с жидкостью в замкнутом объеме при нагревании или охлаждении этих веществ (–150–600).

*Термометры сопротивления* – основаны на свойстве металлических проводников изменять в зависимости от нагрева их электрическое сопротивление (–260–1100).

*Термоэлектрические термометры* – построены на свойстве разнородных металлов и сплавов образовывать в паре (спае) термоэлектродвижущую силу, зависящую от температуры спае (–200–2500).

*Пирометры* – работают по принципу измерения излучаемой нагретыми телами энергии, зависящей от температуры этих тел (300–6000).

**Давлением** жидкости, газа или пара называют силу, действующую равномерно на площадь, а единицей давления – единицу силы, действующую равномерно на единицу площади.

Приборы, измеряющие давление и разрежение, подразделяются на следующие основные группы:

- **манометры**, измеряющие избыточное давление (газа, пара, жидкости) более атмосферного;
- **вакуумметры**, измеряющие давление менее атмосферного;
- **мановакуумметры**, измеряющие давление менее атмосферного и избыточное;
- **тягомеры, напоромеры и тягонапоромеры**, измеряющие небольшие разрежения и давления;
- **дифференциальные манометры**, измеряющие перепад или разность давлений.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с приборами для измерения температуры и давления в лаборатории.
  2. Измерить температуру и давление. Рассчитать давления в различных единицах измерения: атм.; Па; м вод. ст. – абсолютные, избыточные.
- Данные измерений и расчетов представить в виде таблицы.

### Обработка результатов измерения

Номер измерения	Тип прибора	Показания прибора	Давление абсолютное			Давление избыточное		
			атм.	Па	м вод. ст.	атм.	Па	м вод. ст.
1								
2								
3								

### Контрольные вопросы

1. Что называется измерением?
2. На какие виды подразделяются измерения?
3. Классификация приборов для измерения температуры.
4. Классификация приборов для измерения давления.
5. Соотношения между единицами системы СИ и производными единицами.

*Лабораторная работа № 2*  
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗОБАРНОЙ  
ТЕПЛОЕМКОСТИ ГАЗОВ**

**Цель работы:** усвоить методы экспериментального определения изобарной теплоемкости газов на примере воздуха либо другого газа. Определить изобарную теплоемкость воздуха и сравнить ее значение со справочными данными.

**Теоретическая часть**

В теплотехнике при расчете теплоты в процессе изменения состояния тела необходимо знать его теплоемкость.

Теплоемкость численно равна теплоте, которую необходимо сообщить телу, чтобы в данном процессе при данных параметрах изменить его температуру на 1 К.

В практике расчетов, в частности для газов, используют удельные значения теплоемкости. Различают, в зависимости от количественной единицы, к которой ее относят, массовую  $c$  (кДж/(кг · К)), объемную  $c'$  (кДж/(м<sup>3</sup> · К)) и молярную  $c_m$  (кДж/(моль · К)) удельные теплоемкости.

Таким образом, удельная теплоемкость тела зависит от количественной единицы, к которой ее относят, от природы тела, характера процесса изменения состояния и параметров состояния тела. Значит, для газа теплоемкость может рассматриваться в данном процессе как функция температуры и давления.

Теплоемкость идеальных газов не зависит от давления: для многих реальных газов вдали от линии насыщения она также считается только функцией температуры. Это относится к азоту, кислороду, воздуху и прочим газам при условиях, близких к нормальным.

Под истинной теплоемкостью понимают ее значение, соответствующее определенной температуре. Истинная удельная массовая теплоемкость – это отношение удельной теплоты при бесконечно малом ее изменении  $dq$  к изменению температуры  $dT$ :

$$c = \frac{dq}{dT}. \quad (2.1)$$

В конечном процессе отношение теплоты  $q$  к изменению температуры  $\Delta T = T_2 - T_1$  называют средней массовой теплоемкостью  $c$  в рассматриваемом интервале  $T_1 - T_2$ .

Каждый газ, как это следует из математического выражения первого закона термодинамики, в зависимости от характера процесса имеет бесчисленное количество числовых значений теплоемкости. При термодинамическом анализе и в теплотехнических расчетах особое место занимают теплоемкости  $c_v$  и  $c_p$  в процессах при постоянном объеме и при постоянном давлении. Для идеальных газов их значений достаточно для определения внутренней энергии и энтальпии.

Универсальные соотношения, устанавливающие связь  $c_v$  и  $c_p$  между собой и с основными параметрами состояния, можно получить с помощью дифференциальных уравнений термодинамики, построенных на базе первого и второго законов термодинамики. Для каждого конкретного газа должна быть также известна форма уравнения состояния  $F(p, v, T) = 0$ .

Например, для идеального газа связь  $c_v$  и  $c_p$  на основе универсальных соотношений и уравнения Клапейрона–Менделеева устанавливается в форме закона Майера:

$$c_p - c_v = R, \quad (2.2)$$

где  $R$  – газовая постоянная данного газа,  $R = \frac{R_\mu}{\mu}$ ;

$R_\mu = 8314$  Дж/(моль · К);  $\mu$  – масса моля газа, кг/моль.

Значения  $c_v$  и  $c_p$  для идеальных газов предсказываются молекулярно-кинетической теорией. Более точно они определяются с помощью спектроскопических методов, основанных на применении квантовой физики.

Теплоемкость наиболее важных газов определяется экспериментально. Среднюю изобарную теплоемкость  $c_p$  почти всегда определяют методом проточного калориметрирования. Через проточный калориметр пропускают газ, который нагревается расположенным внутри электронагревателем. В стационарном режиме измеряют подведенную к газу от нагревателя теплоту, температуры газа на входе и выходе калориметра и расход газа.

Теплоемкость рассчитывают на основании уравнения первого закона термодинамики для потока, записанного для входного и выходного сечений калориметра:

$$q = q_{эл} + q_{т.п} = h_2 - h_1 + \frac{w_2^2}{2} - \frac{w_1^2}{2} + l_T + g(x_2 - x_1). \quad (2.3)$$

Здесь удельная теплота, отнесенная к 1 кг газа:  $q$  – подведенная к газу в калориметре;  $q_{\text{эл}}$  – подведенная к газу от нагревания;  $q_{\text{т.п}}$  – тепловые потери калориметра в окружающую среду.

Разность скоростей  $w_1$  и  $w_2$  высот  $x_1$  и  $x_2$  мала, техническая работа не совершается, тепловые потери в калориметре самоулавливаются, для адиабатного калориметра  $q_{\text{т.п}} = 0$ .

В общем случае энтальпия газа зависит от температуры и давления:

$$dh = c_p dT - \left[ T \left( \frac{dv}{dT} \right)_p - v \right] dp. \quad (2.4)$$

На лабораторных стендах определяется теплоемкость воздуха, гелия, аргона, азота и других газов, которые при атмосферном давлении и температуре, близкой к комнатной, по своим свойствам близки к идеальным газам. Уравнение (2.4) после вычисления частной производной с помощью уравнения состояния идеального газа для теплоемкости, средней в конечном интервале изменения температуры, запишется в виде:

$$h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1). \quad (2.5)$$

Тогда, подставляя (2.5) в (2.3), с учетом предыдущего получим:

$$q = q_{\text{эл}} = h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1). \quad (2.6)$$

Если  $q_{\text{эл}}$  связано с электрической мощностью нагревателя  $W_{\text{эл}}$  и массовым расходом газа через калориметр, то

$$q_{\text{эл}} = \frac{W_{\text{эл}}}{m}. \quad (2.7)$$

Объединяя (2.6) и (2.7), получим формулу для определения средней изобарной теплоемкости в проточном адиабатном калориметре:

$$\bar{c}_p = \frac{W_{\text{эл}}}{m \Delta T}. \quad (2.8)$$

### ***Схема и описание лабораторной установки***

Основная часть установки, изображенной на рис. 2.1 – проточный электрокалориметр 5, представляющий собой многоходовой стеклянный теплообменник. На оси размещен калориметрический нагреватель 6 из нихромовой спирали сопротивлением около 90 Ом.

Поток газа из внешних каналов подходит к нагревателю, обеспечивая тем самым самоулавливание тепловых потерь из центральной нагретой зоны подходящим холодным газом.

Температура газа на входе и выходе из калориметра измеряется хромель-алюмелевыми термопарами. Термопары подключены к многоканальному цифровому прибору для измерения температуры 10 типа А-565. Температуры  $t_1$  и  $t_2$ , соответственно, на входе и выходе в градусах Цельсия индицируются на табло прибора при нажатии клавиши соответствующего канала.

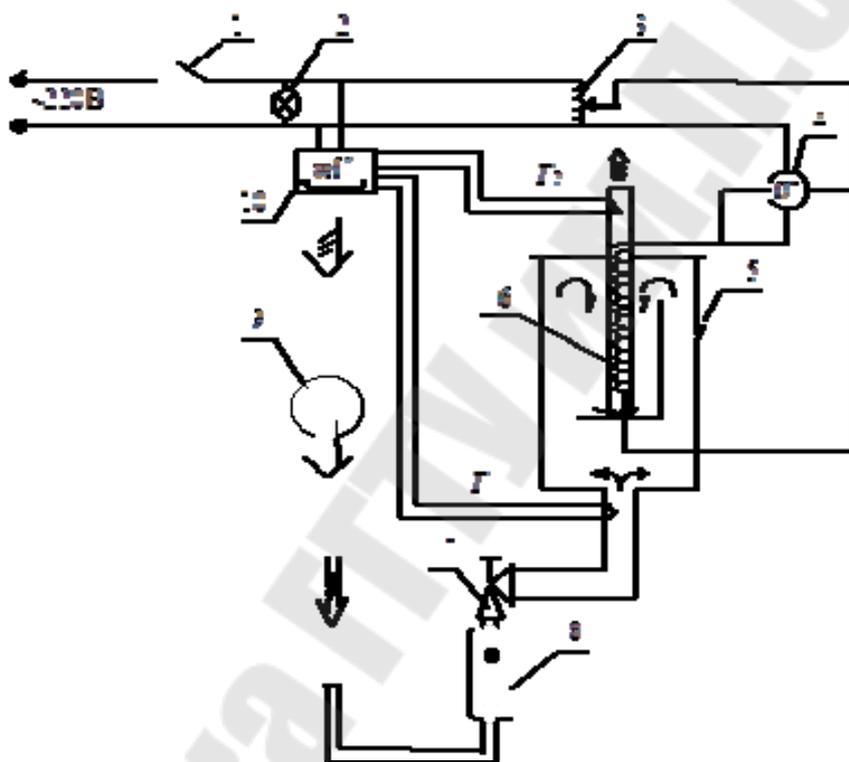


Рис. 2.1. Схема установки:

- 1 – выключатель; 2 – лампа; 3 – автотрансформатор; 4 – ваттметр;  
 5 – проточный электрокалориметр; 6 – нагреватель; 7 – вентиль;  
 8 – ротаметр; 9 – компрессор; 10 – многоканальный цифровой прибор для измерения температуры

Таблица 2.1

**График определения расхода ротаметра РМ-06 № 3812  
 (температура среды 20 °С, давление 760 мм рт. ст.)**

Деления шкалы	0	10	20	40	60	80	100
Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч	0,046	0,065	0,087	0,128	0,170	0,214	0,260

Воздух в калориметре подается компрессором УК-25-16М (поз. 9). Расход газа регулируется с помощью игольчатого вентиля 7. Объемный расход измеряется по показаниям ротаметра 8 и его градуировочному графику для воздуха (рис. 2.2).

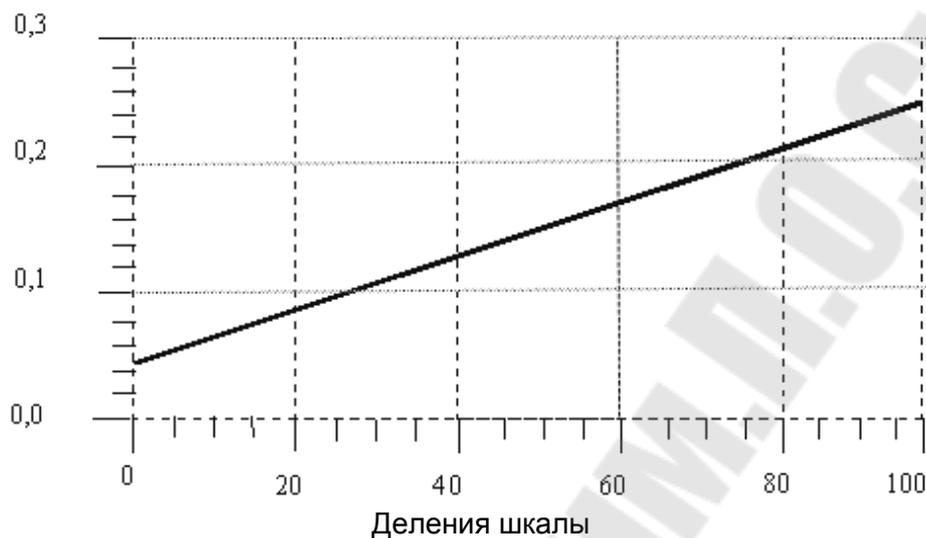


Рис. 2.2. Градуировочный график ротаметра для воздуха

Электрическая мощность нагревателя 6 регулируется лабораторным автотрансформатором 3 и измеряется ваттметром Д 5086 (поз. 4).

Давление газа в калориметре определяется по показанию барометра БАММ-1 в помещении лаборатории.

### Порядок выполнения работы

К работе на установке допускаются лица, изучившие инструкцию и получившие инструктаж по технике безопасности.

1. Выключателем 1 подать напряжение на лабораторный стол. При этом должна загореться лампочка 2.

2. Вентилем 7 ротаметра 8 установить и поддерживать требуемый расход газа. Значение расхода считывают на шкале ротаметра по верхней точке шарика-поплавка и определяют по градуировочному графику (рис. 2.2).

3. Вращением рукоятки автотрансформатора установить требуемое значение мощности на нагревателе 6. Значение мощности контролируют по ваттметру Д 5086 (поз. 4).

4. Выход установки на стационарный режим определить по температуре  $t_2$  газа после калориметра, для чего значение  $t_2$  с интерва-

лом в три минуты зафиксировать и занести в отдельную таблицу. Когда значение  $t_2$  установится, определить показания ваттметра, ротаметра, барометра, температуры  $t_1$  и  $t_2$  по прибору А-565 и занести их в журнал наблюдений. Для контроля за стабильностью параметров и определения случайной погрешности измерений в данной последовательности провести опыт несколько раз.

5. После согласования с преподавателем полученных результатов калориметрические опыты провести 2–3 раза при других режимах; рекомендуемые значения расхода 50, 70, 90 делений по шкале ротаметра и, соответственно, мощности – 1,5; 2,5; 3,0 Вт. Температура на выходе из калориметра при этом не должна превышать 60 °С, что обеспечивает для данной конструкции калориметра достаточно эффективную реализацию самоулавливания тепловых потерь.

6. После окончания опытов установить ручку автотрансформатора в нулевое положение, выключить выключатель 1, затем через минуту закрыть вентиль 7.

Сотрудник лаборатории отключает компрессор 9.

### Обработка результатов измерений

1. По измеренным значениям объемного расхода в делениях шкалы ротаметра необходимо определить по градуировочному графику ротаметра (рис. 2.2) значения объемного расхода воздуха  $V$ , м<sup>3</sup>/ч. Эти значения  $V$  соответствуют параметрам  $p = 760$  мм рт. ст. и  $t = 20$  °С, при которых проводилась градуировка ротаметра.

2. Результаты измерений мощности  $W_{эл}$ , температур  $t_1$ ,  $t_2$  и объемного расхода  $V$  в каждом опыте усреднить и занести в табл. 2.2.

3. Определить параметры газа на входе в калориметр:

$$T_1 = t_1 + 273,15, \text{ К}; \quad p_1 = p_d.$$

4. Действительный расход воздуха через ротаметр:

$$V_d = V \sqrt{\frac{p_r T_0}{p_1 T_r}} \frac{1}{3600}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2.9)$$

5. Рассчитать удельный объем воздуха  $v_B$ , соответственно, на входе в калориметр по формуле

$$v_B = \frac{RT_1}{p_d}, \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (2.10)$$

6. Определить массовый расход газа через калориметр из соотношения

$$m = \frac{V_{\text{д}}}{v_{\text{в}}}, \text{ кг/с.} \quad (2.11)$$

7. Рассчитать среднюю массовую изобарную теплоемкость газа, соответствующую температуре  $T = 0,5(t_1 + t_2) + 273,15$  К по формуле

$$\bar{c}_p = \frac{W_{\text{эл}}}{m \cdot \Delta T}, \quad (2.12)$$

где  $W_{\text{эл}}$  – электрическая мощность нагревателя, Вт;  $\Delta T = T_2 - T_1$  – перепад температур на выходе и входе калориметра, К.

8. Далее, полученные результаты по  $\bar{c}_p$  для каждого опыта можно сравнить с табличными  $c_p^{\text{T}}$ , взятыми из литературы при той же температуре  $\bar{T}$  или в том же интервале  $T_1 - T_2$ .

Таблица 2.2

### Обработка результатов измерений

Номер опыта	Расход воздуха $V, \text{ м}^3$	Температура, °С		Мощность нагревателя $W_{\text{эл}}, \text{ Вт}$	Массовый расход $m, \text{ кг/с}$	$c_p, \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$
		на входе $t_1$	на выходе $t_2$			

### Контрольные вопросы

1. Понятие теплоемкость и ее зависимость от количественной единицы, к которой ее относят.
2. Какие факторы влияют на величину теплоемкости?
3. Понятие истинной и средней теплоемкости.
4. Физическая сущность изохорной и изобарной теплоемкостей и уравнение Майера, связывающее их.
5. Уравнение первого закона термодинамики для потока, для входного и выходного сечений калориметра.
6. Как определяется средняя изобарная теплоемкость в проточном адиабатном калориметре?

## Лабораторная работа № 3 (4 части)

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

#### Цель работы:

Часть 1: исследовать изотермический процесс. Проверить справедливость закона Бойля–Мариотта на примере воздуха.

Часть 2: исследовать изохорный процесс. Проверить справедливость закона Шарля на примере воздуха.

Часть 3: исследовать изобарный процесс. Проверить справедливость закона Гей–Люссака на примере воздуха.

Часть 4: исследовать адиабатный процесс. Определить показатель адиабаты.

#### Теоретическая часть

При изучении термодинамических процессов идеальных газов должны быть решены основные задачи:

1. Определение уравнения процесса  $f(p, v) = 0$ , устанавливающего закономерность изменения состояния рабочего тела в процессе.

2. Выявление особенностей преобразования подведенного к рабочему телу количества теплоты, распределение ее между изменением внутренней энергии и совершаемой рабочим телом внешней работой. Основой решения задачи является уравнение первого начала термодинамики, записанное при соблюдении условий, присущих рассматриваемому процессу. Совокупность уравнений процесса и состояния идеального газа дают возможность получать соотношения различных параметров газа в виде функциональных зависимостей вида:  $p = f(v)$ ;  $s = f(T)$  и др.

Основными процессами являются: изохорный, протекающий при постоянном объеме; изобарный, протекающий при постоянном давлении; изотермический, происходящий при постоянной температуре; адиабатный – процесс, при котором отсутствует теплообмен с окружающей средой, и политропный, удовлетворяющий уравнению  $pv^n = \text{const}$ .

#### Анализ политропных процессов

Теплоемкость политропного процесса  $c = c_v \frac{n-k}{n-1}$  показывает, что теплоемкость идеального газа в каждом термодинамическом процессе имеет свое значение.

Вся теплота  $q$ , подведенная к рабочему телу в политропном процессе, в общем случае расходуется на изменение внутренней энергии и совершение работы.

Доля теплоты, расходуемая на изменение внутренней энергии в политропном процессе:

$$\varphi = \frac{du}{dq} = \frac{c_v dT}{cdT} = \frac{c_v}{c} = \frac{n-1}{n-k}. \quad (3.1)$$

Доля теплоты, идущая на совершение внешней работы:

$$\psi = \frac{dl}{dq} = 1 - \frac{du}{dq} = 1 - \frac{n-1}{n-k} = \frac{1-k}{n-k}. \quad (3.2)$$

Определим величины  $\varphi$  и  $\psi$  для рассмотренных выше термодинамических процессов, а результаты сведем в табл. 3.1.

Таблица 3.1

#### Характеристика процессов

Процесс	$n$	$c$	$\varphi$	$\psi$
Изохорный	$\pm\infty$	$c_v$	1	0
Изобарный	0	$c_p$	$\frac{1}{k}$	$k - \frac{1}{k}$
Изотермический	1	$\infty$	0	1
Адиабатный	$k$	0	–	–
Политропный	$n$	$c_v \frac{n-k}{n-1}$	$\frac{n-1}{n-k}$	$\frac{1-k}{n-k}$

Полученные результаты справедливы лишь тогда, когда зависимость теплоемкости от температуры не учитывается.

Значение показателя политропы определяет расположение и характер протекания политропического процесса на  $p$ - $v$  диаграмме (рис. 3.1).

Все процессы, исходящие из точки О и располагаемые левее изохоры  $n = \pm\infty$ , имеют отрицательную работу, так как сопровождаются сжатием рабочего тела. Справа от изохоры – положительную работу, так как сопровождаются расширением рабочего тела. Процессы, начинающиеся в точке О и располагающиеся правее и выше адиабаты ( $n = k = \text{const}$ ), в областях I–III и VIII (заштрихованы) протекают с подводом теплоты извне, а в областях IV–VII – с отводом теплоты.

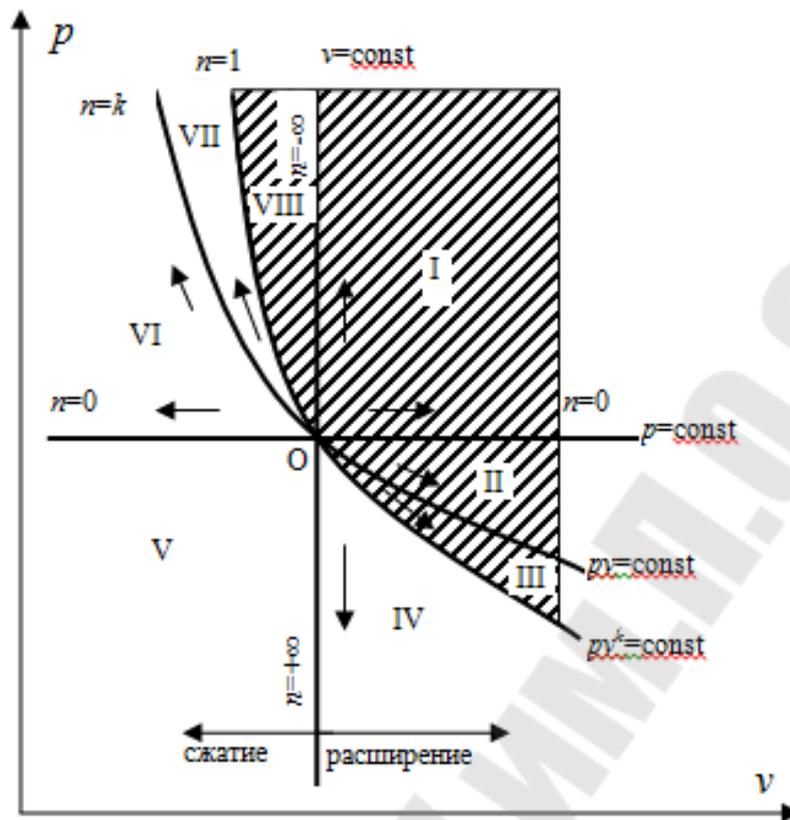


Рис. 3.1.  $p$ - $v$  диаграмма термодинамических процессов

### Описание опытной установки

Установка состоит из стенда и навесного устройства. Конструктивно стенд представляет собой основание, оборудованное:

- 1) интегрированной столешницей;
- 2) вертикальным рабочим полем с сеткой отверстий для быстрого монтажа навесных устройств;
- 3) рабочую панель с органами управления и устройствами индикации (рис 3.5).

К стенду подключается внешний источник сжатого воздуха (компрессор).

Навесное устройство (рис. 3.2) представляет собой пневматический цилиндр двустороннего действия, установленный на раме. На пневматическом цилиндре (параметры цилиндра приведены в табл. 3.2) смонтирована система подачи и сброса воздуха, а также бандажный нагревательный элемент. Пневматическая схема навесного устройства изображена на рис. 3.3.

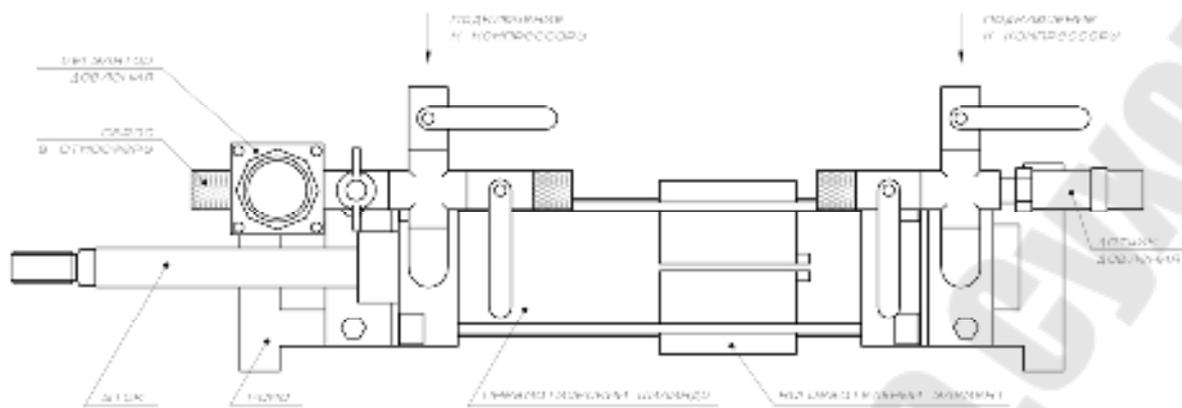


Рис. 3.2. Навесное устройство

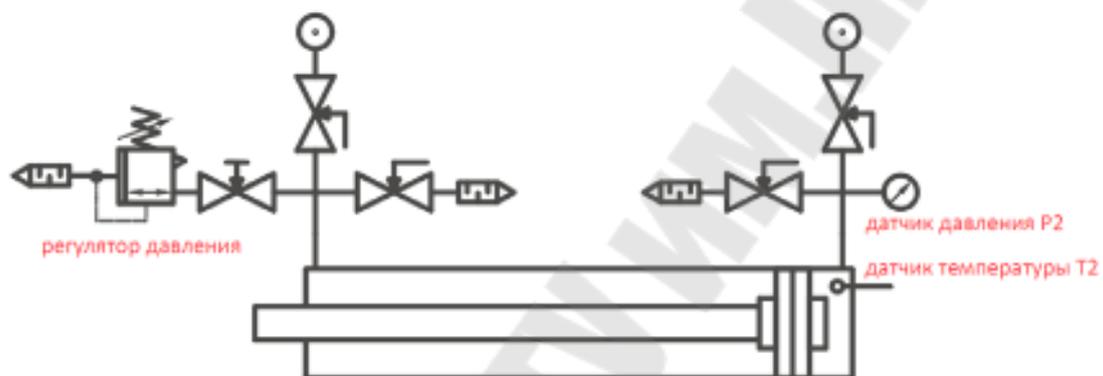


Рис. 3.3. Пневматическая схема навесного устройства

Таблица 3.2

### Характеристики установки

Параметр	Единицы измерения	Значение параметра
Тип цилиндра	–	двустороннего действия
Максимальное рабочее давление	bar	10
Внутренний диаметр цилиндра	м	0,08
Ход штока	м	0,2
Диаметр штока	м	0,025
Усилие на штоке цилиндра – штоковая полость при 4 bar	Н	1600
Усилие на штоке цилиндра – бесштоковая полость при 4 bar	Н	1772
Максимальная допустимая температура	°C	100
Начальный объем бесштоковой полости, $V_0$	м <sup>3</sup>	$6,9 \cdot 10^{-5}$

Для проведения экспериментов следует установить навесное устройство на рабочее поле стенда при помощи эксцентриков и зафиксировать их поворотом ручки.

*Способ крепления навесного устройства может быть изменен.*

Соединить шлангом выход компрессора и штуцера на навесном устройстве. Разъем электрического кабеля навесного устройства подключить к разъему X10 на панели стенда (рис. 3.5).

Подключить компрессор к электросети и установить в ресивере компрессора давление 5–8 bar.

Мертвый объем и конструктивные элементы бесштоковой полости цилиндра (рис. 3.4) при крайнем правом положении штока (максимально задвинут) образуют начальный минимальный объем  $V_0$  (табл. 3.2).



Рис. 3.4. Цилиндр с поршнем

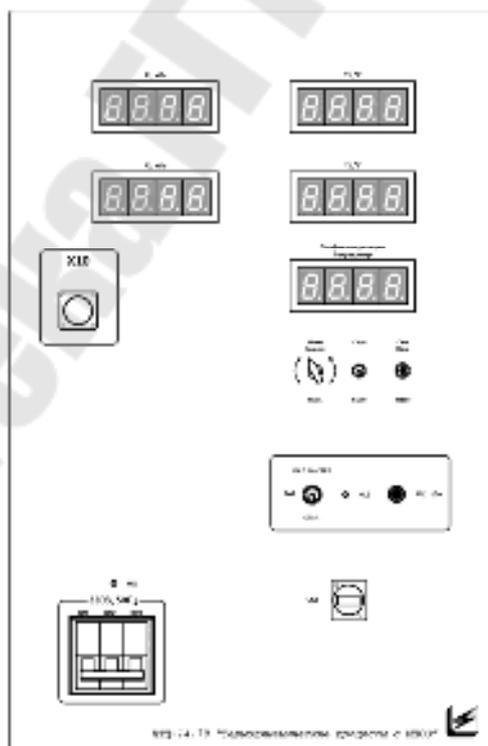


Рис. 3.5. Панель стенда

Измерительная система стенда позволяет измерять давление  $P_2$  и температуру  $T_2$  в полости пневматического цилиндра (исследуемом объеме), атмосферное давление  $P_1$  и температуру  $T_1$ .

При необходимости уточнения величины  $V_0$  провести опыт по заполнению полости водой и по слитому количеству жидкости определить величину  $V_0$ . После этого полость просушить в течение 2–3 ч, открыв краны В1–В4.

Нагрев цилиндра при проведении работ осуществляется бандажным нагревательным элементом. Включение нагревателя осуществляется тумблером SA1, при работающем нагревательном элементе светится индикатор HL2.

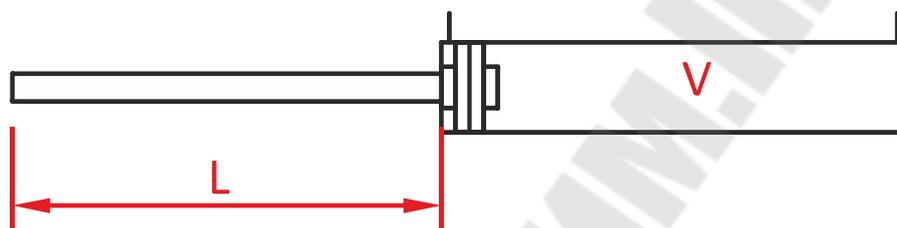


Рис. 3.6. Определение объема полости цилиндра

Объем полости цилиндра при любом положении штока вычисляется как:

$$V = V_0 + LS, \quad (3.3)$$

где  $L$  – текущее положение штока, м;  $S$  – площадь цилиндра,  $\text{м}^2$ .

## Порядок выполнения работы

### Часть 1. Изотермический процесс

1. Установить устройство на рабочее поле стенда.
2. Присоединить выход компрессора к устройству.
3. Включить питание стенда (три автоматических выключателя «Сеть»).
4. Отрегулировать на минимум регулятор давления на выходе компрессора. Закрывать все краны на устройстве (В1–В5). Выставить на минимум регулятор давления на устройстве.
5. Включить компрессор. Создать в ресивере давление 0,5–0,8 МПа.
6. Отрегулировать давление на выходе компрессора до требуемого уровня (0,1–0,5 МПа).
7. Открыть краны В2, В4.

8. Переместить шток цилиндра в крайнее левое положение.
9. Закрыть краны В2, В4.
10. Открыть кран В1. Установить в полости цилиндра требуемое давление.
11. Измерить положение штока, установившиеся значения температуры и давления в полости цилиндра занести в табл. 3.1.
12. Увеличить давление на выходе компрессора с помощью регулятора.
13. Открыть (приоткрыть) кран В3, так, чтобы шток цилиндра переместился на несколько сантиметров (исследуемый объем уменьшится).
14. Дождаться, пока температура в полости цилиндра установится равной начальной. Измерить положение штока, установившиеся значения температуры и давления в полости цилиндра занести в табл. 3.3.
15. Повторять пп. 12–14 до достижения штоком цилиндра крайнего положения.
16. Провести (если требуется) новый эксперимент при других начальных условиях (давлении и температуре).
17. Выключить питание стенда (три автоматических выключателя «Сеть»).
18. Закрыть краны В1, В3. Оставить открытыми краны В2, В4. Сбросить давление из ресивера компрессора. Выключить компрессор.

## **Часть 2. Изохорный процесс**

1. Установить устройство на рабочее поле стенда.
2. Присоединить выход компрессора к устройству.
3. Включить питание стенда (три автоматических выключателя «Сеть»).
4. Отрегулировать на минимум регулятор давления на выходе компрессора. Закрыть все краны на устройстве (В1–В5). Выставить на минимум регулятор давления на устройстве.
5. Включить компрессор. Создать в ресивере давление 0,5–0,8 МПа.
6. Отрегулировать давление на выходе компрессора до требуемого уровня (0,2–0,4 МПа).
7. Открыть краны В2, В4.
8. Переместить шток цилиндра в крайнее левое положение.
9. Закрыть краны В2, В4.
10. Открыть кран В1. Установить в полости цилиндра требуемое давление (0–0,5 МПа).

11. Закрывать кран В1.
12. Измерить установившиеся значения температуры и давления в полости цилиндра, занести в табл. 3.4.
13. Включить нагревательный элемент цилиндра тумблером SA1.
14. По мере нагрева воздуха в полости цилиндра фиксируем значение температуры и давления в табл. 3.4.
15. Продолжить эксперимент до тех пор, пока давление в полости цилиндра перестанет расти.
16. Выключить нагрев тумблером SA1.

### **Часть 3. Изобарный процесс**

#### **1. Изобарное расширение при атмосферном давлении**

1. Установить устройство на рабочее поле станда.
2. Присоединить выход компрессора к устройству.
3. Включить питание станда (три автоматических выключателя «Сеть»).
4. Открыть краны В2, В4.
5. Переместить шток цилиндра в среднее положение.
6. Закрывать краны В2–В4, В1 оставить открытым.
7. Измерить положение штока, установившиеся значения температуры и давления в полости цилиндра занести в табл. 3.5.
8. Включить нагревательный элемент цилиндра тумблером SA1.
9. При нагреве цилиндра воздух расширится, что приведет к росту давления  $P_2$ , шток цилиндра начнет движение влево и давление  $P_2$  будет стремиться к атмосферному. Если давление  $P_2$  превысит первоначальное более чем на 1 кПа, то для сохранения в полости цилиндра постоянного давления – сдвинуть шток вручную.
10. После перемещения штока, измерить его положение  $L_N$ . Величины  $L_N$  и  $t$  занести в табл. 3.5.
11. Продолжить эксперимент до тех пор, пока давление в полости цилиндра перестанет расти.
12. Выключить нагрев тумблером SA1.
13. Выключить питание станда (три автоматических выключателя «Сеть»).

#### **2. Изобарное расширение при повышенном давлении**

1. Провести (если требуется) новый эксперимент при другом начальном давлении. Перед экспериментом цилиндр должен быть охлажден до комнатной температуры.
2. Включить питание станда (три автоматических выключателя «Сеть»).

3. Отрегулировать на минимум регулятор давления на выходе компрессора. Закрывать все краны на устройстве (В1–В5). Выставить на минимум регулятор давления на устройстве.
4. Включить компрессор. Создать в ресивере давление 5–8 bar.
5. Отрегулировать давление на выходе компрессора до требуемого уровня (0–5 bar).
6. Для перемещения штока цилиндра в крайнее левое положение откройте последовательно краны В1, В4. После остановки штока закрыть В1, В4.
7. Отрегулировать на минимум регулятор давления на компрессоре.
8. Для установки штока цилиндра в среднее положение открыть кран В3 и, плавно поднимая давление регулятором на компрессоре, добиться перемещения штока в среднее положение. Закрыть кран В3.
9. Включить нагревательный элемент цилиндра тумблером SA1.
10. При нагреве полости цилиндра воздух расширится, что приведет к росту давления  $P_2$ , для сохранения в полости цилиндра постоянного давления, плавно вращая ручку регулятора на устройстве, сбавить давление из штоковой полости цилиндра, что приведет к перемещению штока.
11. После перемещения штока измерить его положение  $L_N$ . Величины  $L_N$  и  $t$  занести в табл. 3.5.
12. Продолжить эксперимент до тех пор, пока давление в полости цилиндра перестанет расти.
13. Выключить нагрев тумблером SA1.
14. Выключить питание стенда (три автоматических выключателя «Сеть»).
15. Закрыть краны В1, В3. Оставить открытыми краны В2, В4. Сбросить давление из ресивера компрессора. Выключить компрессор.
16. Провести (если требуется) новый эксперимент при другом начальном давлении. Перед экспериментом цилиндр должен быть охлажден до комнатной температуры.
17. Выключить питание стенда (три автоматических выключателя «Сеть»).
18. Закрыть краны В1, В3. Оставить открытыми краны В2, В4. Сбросить давление из ресивера компрессора. Выключить компрессор.

#### **Часть 4. Адиабатный процесс**

1. Установить устройство на рабочее поле стенда.
2. Присоединить выход компрессора к устройству.

3. Включить питание стенда (три автоматических выключателя «Сеть»).
4. Проверить подключение компьютера к стенду (USB из панели стенда) и, если требуется, подключить.
5. Отрегулировать на минимум регулятор давления на выходе компрессора. Закрывать все краны на устройстве (В1–В5). Выставить на минимум регулятор давления на устройстве.
6. Включить компрессор. Создать в ресивере давление 0,5–0,8 МПа.
7. Отрегулировать давление на выходе компрессора до требуемого уровня (0–0,5 МПа).
8. Для перемещения штока цилиндра в крайнее левое положение откройте последовательно краны В1, В4. После остановки штока закрыть В1, В4.
9. Сбросить давление в исследуемом объеме, открыв кран В2. Спустя 1 мин закрыть В2.
10. Запустить программу **ОсциллоГРАФ** (osc32.exe) на компьютере.
11. Настроить отображение сигналов в программе.
12. Сгруппировать исследуемые сигналы для удобства просмотра. Для удобства можно сохранить профиль программы со всеми настройками: **XXXX.set**.
13. Запустить осциллограф.
14. Быстро открыть кран В3, шток цилиндра начнет движение вправо. Сразу после остановки штока закрыть В3. Измерить незамедлительно положение штока, данные занести в табл. 3.6.
15. По графику в окне программы **ОсциллоГРАФ** определить максимальный уровень давления и температуры в полости цилиндра, занести данные в табл. 3.6.
16. Провести серию экспериментов (пп. 5–17).
17. Выключить питание стенда (три автоматических выключателя «Сеть»).
18. Закрывать краны В1, В3. Оставить открытыми краны В2, В4. Сбросить давление из ресивера компрессора. Выключить компрессор.

## Обработка результатов эксперимента

### Часть 1. Изотермический процесс

1. Вычислить  $V$ ,  $P$ ,  $T$  и заполнить табл. 3.3.

$$V = V_0 + LS. \quad (3.4)$$

2. Абсолютное давление в исследуемом объеме равно сумме атмосферного давления ( $P_1$ ) и избыточного в полости цилиндра ( $P_2$ ):

$$P = P_1 + P_2. \quad (3.5)$$

3. Абсолютная температура находится по формуле

$$T = t + 273,15. \quad (3.6)$$

4. Вычислить для каждого шага сжатия  $N$  произведение  $PV$ . Данные занести в табл. 3.3.

5. Построить график зависимости  $P = f(V)$ .

Таблица 3.3

### Исследование изотермического процесса

Параметр	Измерено			Вычислено			
	Положение штока	Избыточное давление	Температура процесса	Объем камеры	Абсолютное давление в камере	Температура процесса	$PV$
$N$	$L, \text{ мм}$	$P_2, \text{ кПа}$	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$V, \text{ м}^3$	$P, \text{ Па}$	$T, \text{ К}$	–
1							
2							
3							
...							

### Часть 2. Изохорный процесс

1. Вычислить  $P, T$  и заполнить табл. 3.4.

2. Вычислить для каждой точки нагрева  $N$  отношение  $\frac{P}{T}$ . Данные занести в табл. 3.4.

3. Построить график зависимости  $P = f(T)$ .

Таблица 3.4

### Исследование изохорного процесса

Параметр	Измерено			Вычислено		
	Время	Избыточное давление	Температура процесса	Абсолютное давление в камере	Температура процесса	$P/T$
$N$	$\text{с}$	$P_2, \text{ кПа}$	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$P, \text{ Па}$	$T, \text{ К}$	–
1						
2						
3						
...						

### Часть 3. Изобарный процесс

1. Вычислить  $P$ ,  $T$ ,  $V$  и заполнить табл. 3.5.
2. Вычислить для каждой точки нагрева  $N$  отношение  $\frac{V}{T}$ . Данные занести в табл. 3.5.
3. Построить график зависимости  $P = f(T)$ .

Таблица 3.5

#### Исследование изобарного процесса

Параметр	Измерено		Вычислено		
	Положение штока	Температура процесса	Объем камеры	Температура процесса	$V/T$
$N$	$L$ , мм	$t$ , °C	$V$ , м <sup>3</sup>	$T$ , К	–
1					
2					
3					
4					
5					
...					

### Часть 4. Адиабатный процесс

1. Вычислить  $P$ ,  $T$ ,  $V$  и заполнить табл. 3.6.
2. Вычислить показатель адиабаты. Данные занести в табл. 3.6.

$$k = \text{Log}_{\frac{V_1}{V_2}} \frac{P_2}{P_1} = \frac{\text{Log}_{10} \frac{P_2}{P_1}}{\text{Log}_{10} \frac{V_2}{V_1}}, \quad (3.7)$$

Таблица 3.6

#### Исследование адиабатного процесса

Измерено	Параметр	$N$	1	2	3
	Атмосферное давление (по $P_1$ )	$P_0$ , кПа			
	Начальное положение штока	$L_1$ , мм			
	Конечное положение штока	$L_2$ , мм			
	Начальная температура процесса	$t_1$ , °C			
	Конечная температура процесса	$t_2$ , °C			
	Начальное избыточное давление (по $P_2$ )	кПа			
	Конечное избыточное давление (по $P_2$ )	кПа			

Вычислено	Параметр	$N$	1	2	3
	Начальный объем	$V_1, \text{м}^3$			
	Конечный объем	$V_2, \text{м}^3$			
	Начальная температура	$T_1, \text{К}$			
	Конечная температура	$T_2, \text{К}$			
	Начальное абсолютное давление	$P_1, \text{кПа}$			
	Конечное абсолютное давление	$P_2, \text{кПа}$			
	Показатель адиабаты по $PV$	$k$			

### Контрольные вопросы

1. Уравнение Менделеева–Клапейрона.
2. Первый закон термодинамики.
3. Идеальный газ.
4. Изохорный процесс в  $p$ - $v$  и  $T$ - $s$  координатах.
5. Изохорный процесс. Основные уравнения.
6. Изобарный процесс в  $p$ - $v$  и  $T$ - $s$  координатах.
7. Изобарный процесс. Основные уравнения.
8. Изотермический процесс в  $p$ - $v$  и  $T$ - $s$  координатах.
9. Изотермический процесс. Основные уравнения.
10. Адиабатный процесс в  $p$ - $v$  и  $T$ - $s$  координатах.
11. Адиабатный процесс. Основные уравнения.

## Лабораторная работа № 4

# ИССЛЕДОВАНИЕ КРИВОЙ УПРУГОСТИ ВОДЯНОГО ПАРА

**Цель работы:** экспериментальное установление зависимости абсолютного давления насыщенного водяного пара  $p_n$  от его температуры  $T_n$  в процессе парообразования; ознакомление с методом определения теплоты парообразования водяного пара  $r$  на основании экспериментально полученной упругости  $p_n = f(T_n)$ .

### Теоретическая часть

Процесс превращения вещества из жидкого состояния в газообразное называется парообразованием.

Процесс кипения заключается в том, что если к жидкости подводить теплоту, то при некоторой температуре, зависящей от физических свойств жидкости и давления, наступает процесс парообразования как на свободной поверхности жидкости, так и внутри ее.

Пар, соприкасающийся с жидкостью и находящийся с ней в термическом равновесии, называется насыщенным. С изменением температуры жидкости равновесие нарушается, вызывая соответствующее изменение плотности и давления насыщенного пара.

Насыщенный пар, в котором отсутствуют взвешенные мельчайшие частицы жидкой фазы, называется сухим насыщенным паром. Состояние сухого насыщенного пара определяется только одним параметром – давлением или удельным объемом, или температурой. Насыщенный пар, в котором содержатся взвешенные высокодисперсные частицы жидкой фазы, равномерно распределенные по всей массе пара, называется влажным насыщенным паром.

Отношение массы сухого насыщенного пара к суммарной массе влажного насыщенного пара (пар + жидкость) обозначается  $X$  и называется степенью сухости пара или паросодержанием.

Если сухому насыщенному пару сообщить некоторое количество теплоты при постоянном давлении, то температура его будет возрастать. Пар, получаемый в этом процессе, называется перегретым. Он по своим физическим свойствам приближается к газу, и тем ближе, чем выше степень перегрева.

Рассмотрим фазовую  $p$ - $v$  диаграмму у системы, состоящей из жидкости и пара, представляющей собой график зависимости удельных объемов воды и пара от давления (рис. 4.1). Кривая  $AE$  выражает

зависимость удельного объема воды от давления при температуре  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Так как вода – вещество почти несжимаемое, то кривая  $AE$  почти параллельна оси ординат. Если при постоянном давлении сообщить воде теплоту, то ее температура будет повышаться (линия  $t_m$ ), вода закипает (точка  $A'$ ). В случае дальнейшего подвода теплоты при постоянном давлении начинается процесс парообразования. В момент окончания парообразования в точке  $B'$  пар будет сухим насыщенным. Процесс парообразования  $A'B'$  является одновременно изобарным и изотермическим.

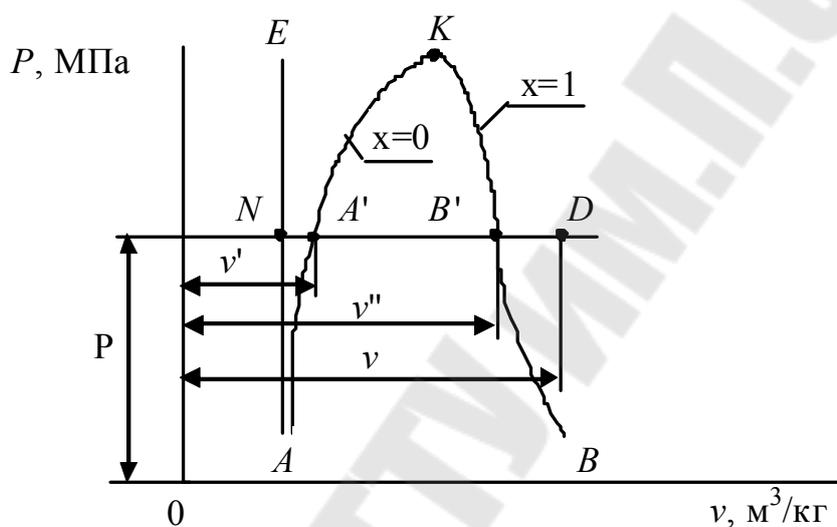


Рис. 4.1. График зависимости давления от удельных объемов воды и пара

Кривая  $AK$  – нижняя пограничная кривая ( $x = 0$ ) – это геометрическое место точек, отображающих состояние кипящей жидкости при различных давлениях.

Кривая  $KB$  – верхняя пограничная кривая ( $x = 1$ ) – это геометрическое место точек, отображающих состояние сухого насыщенного пара при различных давлениях; обе кривые делят диаграмму на три части. Влево от кривой  $AK$  располагается область жидкости. Между кривыми  $AK$  и  $KB$  располагается двухфазная система, состоящая из смеси воды и сухого пара. Вправо от  $KB$  и вверх от точки  $K$  располагается область перегретого пара.  $K$  – критическая точка. Количество теплоты, затраченное на парообразование 1 кг воды при температуре кипения до сухого насыщенного пара, называется удельной теплотой парообразования. Удельная теплота парообразования расходуется на изменение внутренней потенциальной энергии ( $u'' - u'$ ) и на внеш-

ную работу расширения  $p(v'' - v')$ . Теплота парообразования:  $r = (u'' - u') + p(v'' - v') = \rho + \varphi$ , Дж/кг.

Величина  $\rho$  – внутренняя, а  $\varphi$  – внешняя теплота парообразования.

Переход вещества с заданным давлением  $p_n$  из жидкой фазы в газообразную происходит, как известно, при определенной температуре  $T_n$ , называемой температурой насыщения, и осуществляется за счет подвода теплоты парообразования  $r$ . Очевидно, что каждое равновесное состояние фаз «жидкость–пар» изобразится точкой фазовой  $p$ - $T$  диаграммы, а кривая, соединяющая такие точки, представляет зависимость  $p_n = f(T_n)$  и называется кривой фазового равновесия.

Фазовая диаграмма водяного пара приведена на рис. 4.2. На ней изображена соответствующая кривая фазового равновесия – так называемая кривая упругости.

Точки, лежащие на кривой фазового равновесия, соответствуют двухфазной системе «жидкость–пар». Точки, лежащие на  $p$ - $T$  диаграмме по обе стороны от кривой упругости, соответствуют однородным состояниям вещества, т. е. отдельным фазам.

Кривая фазового равновесия, как видно из рис. 4.2, начинается в «тройной точке», где достигается равновесное состояние трех фаз – жидкость, твердое тело, пар – и заканчивается в критической точке  $K$ , для которой плотность жидкой и газообразной фаз одинаковы.

Параметры критической точки определяются значениями критического давления  $p_k$  – наибольшего давления, при котором возможно существование двухфазной системы «жидкость–пар», и критической температуры  $T_k$  – наивысшей температуры, при которой возможно существование жидкой фазы. При давлениях, превосходящих  $p_k$ , переход из жидкого состояния в газообразное отсутствует, поскольку при таких давлениях нет принципиального различия между жидкостью и газом.

В технической термодинамике ко всяким изменениям агрегатного состояния химически однородных веществ (сублимация, плавление, конденсация) применимо уравнение Клайперона–Клаузиуса, которое для процесса парообразования имеет вид:

$$r = T_n (v'' - v') \frac{dp_n}{dT_n}, \quad (4.1)$$

где  $r$  – теплота парообразования, кДж/кг;  $T_n$  – температура фазового перехода (для процесса парообразования – температура насыщения), К;

$p_H$  – абсолютное давление насыщенного водяного пара, кПа;  $v''$ ,  $v'$  – удельные объемы находящихся в равновесии фаз (для процесса парообразования – удельные объемы сухого насыщенного пара и кипящей воды), м<sup>3</sup>/кг;  $\frac{dp_H}{dT_H}$  – производная от давления по температуре, взятая на кривой фазового перехода или кривой упругости, кПа/К.

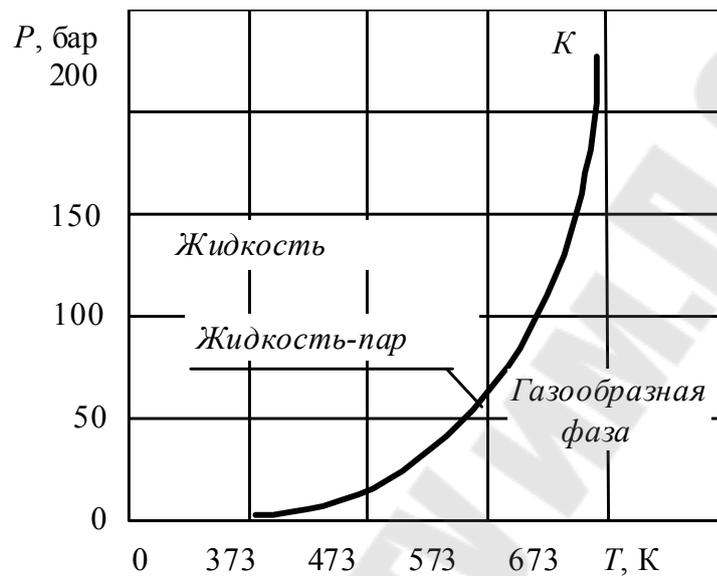


Рис. 4.2. Кривая упругости водяного пара

Входящие в (4.1) абсолютное давление  $p_H$  и температура  $T_H$  вычисляются по формулам:

$$p_H = p_{\text{бар}} - p_{\text{вак}}; \quad (4.2)$$

$$T_H = t_H + 273,15, \quad (4.3)$$

где  $p_{\text{бар}}$ ,  $p_{\text{вак}}$  – соответственно, барометрическое и вакуумметрическое давления, кПа;  $t_H$  – температура насыщения, °С.

Анализируя выражения (4.1)–(4.3), приходим к следующим выводам:

- 1) для нахождения теплоты парообразования необходимо уметь пользоваться таблицами теплофизических свойств воды и водяного пара и знать фазовые диаграммы  $p-v$ ,  $T-s$ ,  $h-s$ ;
- 2) указанные зависимости определяют величины  $p_{\text{бар}}$ ,  $p_{\text{вак}}$ ,  $t_H$ , которые необходимо измерять при проведении экспериментов.

## Схема и описание лабораторной установки

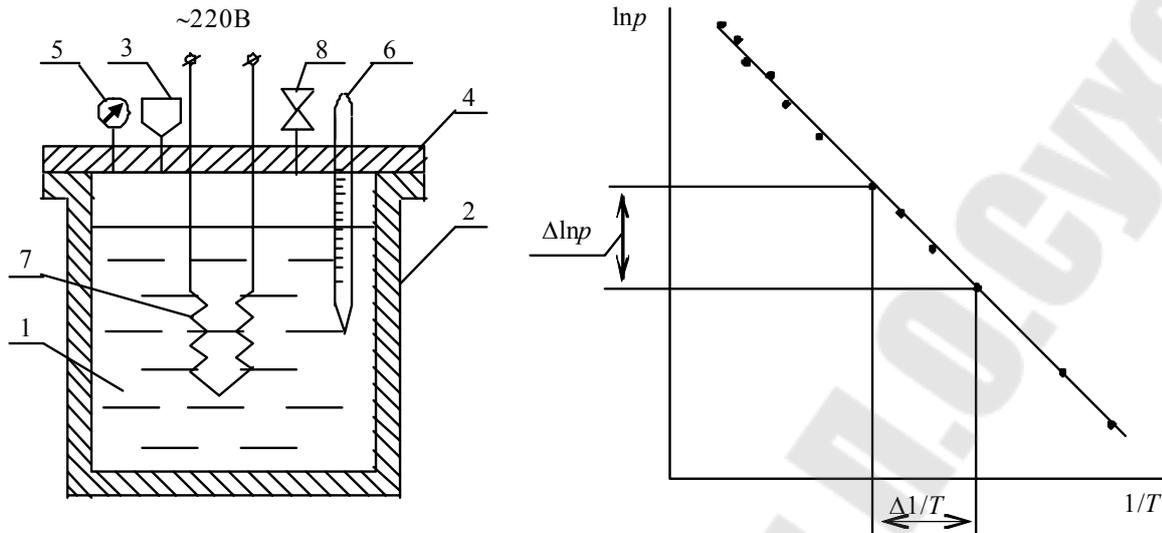


Рис. 4.3. Схема установки и зависимость  $\ln p = f(1/T)$

Для установления зависимости между давлением и температурой используют установку, представленную на рис. 4.3. Исследуемая жидкость  $l$  (вода) находится в котле 2, представляющем собой толстостенный металлический сосуд цилиндрической формы. На крышке 4 котла установлен манометр 3 и термометр 6, которые позволяют следить за давлением и температурой в котле. Внутри котла расположен электронагреватель 7 для нагрева воды. Предохранительный клапан 3 рассчитан на давление  $p = 0,25$  МПа. Для заполнения котла водой используется отверстие, закрываемое пробкой 8.

### Порядок выполнения работы

1. Приступая к выполнению работы, необходимо ознакомиться с описанием работы.
2. Включить установку в сеть, предварительно открыв пробку 8 котла.
3. При достижении водой температуры кипения, т. е. при  $t = t_n$ , когда начинается обильное выделение пара, пробку котла закрыть.
4. Следить за изменением давления и температуры по приборам. Снять все показания прибора (манометры и термометры) и занести в таблицу. Интервал между замерами – одно деление по манометру.
5. Опыт проводить до давления по манометру не более 0,1 МПа.

6. По окончании опыта установку выключить из сети и провести опыт в обратном направлении:

$$p_{\text{абс}} = p_{\text{атм}} + p_{\text{изб}}, \text{ Па.} \quad (4.4)$$

### Результаты измерений

$p_{\text{изб}}, \text{ кг/см}^2$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0
$p_{\text{абс}}, \text{ Па}$											
$T, \text{ К}$											
$1/T$											
$\ln p_{\text{абс}}$											

### Обработка результатов измерений

Для двухфазной системы (пар + жидкость) зависимость между  $p$  и  $T$  выражается уравнением Клайперона–Клаузиуса:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{r}{T\Delta v}, \quad (4.5)$$

где  $\Delta v = v'' - v'$  – разность удельных объемов фаз.

Если вторая фаза является идеальным газом, то уравнение (4.5) можно переписать в виде:

$$d(\ln p) = \frac{r}{R} d\left(\frac{1}{T}\right). \quad (4.6)$$

Отсюда

$$r = \frac{d(\ln p)}{d\left(\frac{1}{T}\right)} R. \quad (4.7)$$

Для определения величины  $\frac{d(\ln p)}{d\left(\frac{1}{T}\right)}$  необходимо построить график

$\ln p = f\left(\frac{1}{T}\right)$ , по которому находят тангенс угла наклона этой зависимости, т. е.  $\text{tg}\varphi \approx \frac{\Delta(\ln p)}{\Delta\left(\frac{1}{T}\right)}$ , град. Затем по формуле  $r = \text{tg}\varphi R$  определяют

удельную теплоту парообразования. Для воды  $R = 461,9 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град.}$

## Контрольные вопросы

1. Что называется кипением жидкости?
2. Основные состояния пара.
3. Изобразить в  $p$ - $v$  и  $T$ - $s$  диаграммах процесс парообразования.
4. Что такое нижняя и верхняя пограничная кривая?
5. Что называется теплотой парообразования?
6. Что такое степень сухости и степень влажности пара?
7. Что такое удельная теплота парообразования?
8. Пояснить уравнение Клайперона–Клаузиуса.

## Лабораторная работа № 5

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ СУЖИВАЮЩЕЕСЯ СОПЛО

**Цель работы:** исследовать зависимость расхода и скорости воздуха, вытекающего через суживающееся сопло, от отношения давлений за соплом и перед ним, определить коэффициенты скорости и расхода сопла.

#### Теоретическая часть

Рабочие процессы при движении газов реализуются во многих машинах и аппаратах. Термодинамический анализ открытых потоковых систем применительно к движению газов в каналах проводится при следующих условиях.

Рассматривается стационарное движение одномерного потока, т. е. параметры изменяются в направлении оси канала. При отсутствии массового воздействия уравнение сплошности (неразрывности) соответствует постоянству массового расхода:

$$\frac{fw}{v} = \frac{V}{v} = m = \text{const}, \quad (5.1)$$

где  $f$  – площадь сечения канала,  $\text{м}^2$ ;  $w$ ,  $v$ ,  $V$  – соответственно, скорость,  $\text{м/с}$ ; удельный объем рабочего тела,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ; объемный расход в данном сечении,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $m$  – массовый расход,  $\text{кг/с}$ .

Уравнение первого закона термодинамики для потока в этом случае имеет вид:

$$dq = dh + wdw + dl_T + gdz, \quad (5.2)$$

где  $dq$  – внешняя теплота процесса,  $\text{Дж/кг}$ ;  $dl_T$  – техническая работа;  $wdw$  – кинетическая энергия потока;  $dh$ ,  $gdz$  – соответственно, энтальпия,  $\text{Дж/кг}$ , и потенциальная энергия рабочего тела в данном сечении.

Помимо уравнений неразрывности и первого закона, к основным уравнениям термодинамики потока относятся уравнение процесса и уравнение состояния. Для реальных газов (паров) вместо уравнения состояния ввиду его сложности при практических расчетах пользуются диаграммами, таблицами термодинамических свойств либо построенными на их основе ЭВМ-программами. Для воздуха с достаточной для

практических целей точно допустимо использование уравнения состояния идеальных газов:

$$pv = RT, \quad (5.3)$$

где  $R = \frac{R_\mu}{\mu}$  – газовая постоянная данного газа, Дж/(кг · К);  $p$ ,  $T$  – соответственно, абсолютное давление, Па, и абсолютная температура, К.

При анализе истечения газа из сопла процесс считается энергетически изолированным ( $dq = 0$ ,  $d_T = 0$ ) и изменением потенциальной энергии положения пренебрегают  $gdz (= 0)$ .

Тогда для любого сечения канала из (5.2) следует, что

$$h + \frac{w^2}{2} = h_0 = \text{const}, \quad (5.4)$$

т. е. увеличение кинетической энергии при истечении из сопла происходит за счет уменьшения энтальпии. При рассмотрении процесса течения идеального газа как обратимого с постоянной теплоемкостью используется уравнение адиабатного процесса  $pV^k = p_0V_0^k = \text{const}$ ;

$$Tp^{\frac{1-k}{k}} = T_0p_0^{\frac{1-k}{k}} = \text{const}. \quad (5.5)$$

В (5.4), (5.5)  $h_0 = c_p T_0$ ,  $p_0$ ,  $T_0$ ,  $V_0$  – параметры обратимого адиабатного торможения,  $k = \frac{c_p}{c_v}$  – показатель адиабаты.

Таким образом, увеличение скорости газа происходит при уменьшении его давления и температуры.

Задача анализа истечения из суживающегося или простого сопла состоит в определении скорости  $w_2$  на выходе из сопла и расхода газа при заданных параметрах  $h_0$ ,  $p_0$ ,  $v_0$  (или  $h_1$ ,  $P_1$ ,  $V_1$ ,  $w_1$ ), давлении среды за соплом  $p_c$  и площади выходного сечения сопла  $f_2 = f_{\min}$ .

Для скорости истечения из (5.4) в общем случае получим:

$$w_2 = \sqrt{2(h_0 - h_2)}, \quad (5.6)$$

в частности, при обратимом процессе с идеальным газом, используя (5.3), (5.5):

$$w_2 = \sqrt{2C_p(T_0 - T_2)} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_0 V_0 \left( 1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right)}. \quad (5.7)$$

Расход газа в общем случае можно определить из уравнения неразрывности (5.1) для выходного сечения:

$$m = \frac{f_2 w_2}{v_2}, \quad (5.8)$$

при обратимом процессе идеального газа с учетом (5.7), (5.5):

$$m = f_2 \sqrt{\frac{2k}{k-1}} \frac{p_0}{v_0} \left( \beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}} \right), \quad (5.9)$$

где  $\beta = \frac{p_0}{p_c}$  – отношение давлений.

Сравнение параметров в выходном сечении в зависимости от значения  $\beta$  при уменьшении  $p_c$ , рассчитанных по (5.7), (5.9) и полученных из опытных данных, показывает ряд особенностей истечения из суживающегося сопла (рис. 5.1).

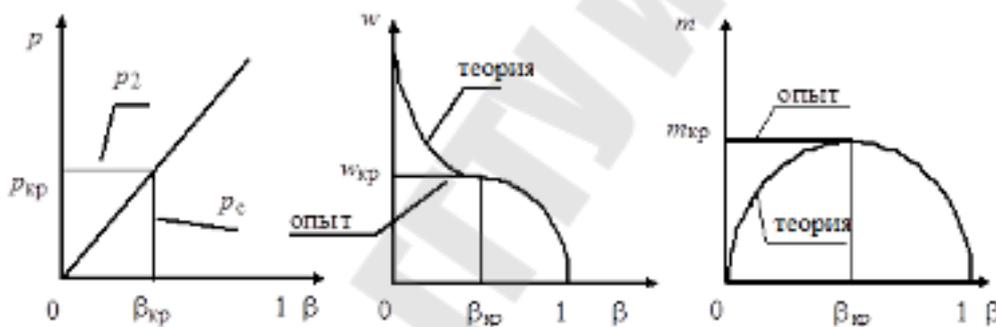


Рис. 5.1. Сравнение параметров в выходном сечении в зависимости от значения  $\beta$  при уменьшении  $p_c$

Невозможно получить давление газа в выходном сечении  $p_2$  ниже значения  $p_{кр}$ . При  $\beta = \frac{p_c}{p_0} < \beta_{кр} = \frac{p_{кр}}{p_0}$  скорость истечения с уменьшением  $p_0$  не увеличивается, это критическое значение равно местной скорости звука.

При  $\beta \leq \beta_{кр}$  расход газа через сопло устанавливается на уровне максимального значения. Величина  $p_c = p_{кр}$  и  $\beta_{кр}$  определяется из анализа на максимум функции (5.9):

$$\beta_{кр} = \frac{p_{кр}}{p_0} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (5.10)$$

Таким образом, при  $\beta > \beta_{кр}$  скорость истечения из суживающегося сопла определяется по (5.6), (5.7), расход рабочего тела – по (5.8), (5.9). При  $\beta \leq \beta_{кр}$  в (5.7), (5.9) вместо  $\beta$  подставляется значение  $\beta_{кр}$ , в (5.6), (5.8) параметры  $w_2$ ,  $v_2$ ,  $h_2$  заменяются на  $w_{кр}$ ,  $v_{кр}$ ,  $h_{кр}$ , т. е. определяются по формуле

$$p_{кр} = p_0 \beta_{кр}. \quad (5.11)$$

Реальный процесс адиабатного истечения всегда сопровождается трением и является необратимым. Потери на трение приводят к уменьшению скорости истечения и увеличению энтропии рабочего тела.

Действительная скорость истечения:

$$w_{2д} = \sqrt{2(h_0 - h_{2д})}. \quad (5.12)$$

Расход:

$$m_{д} = \frac{f_2 w_{2д}}{V_{2д}}. \quad (5.13)$$

Степень приближения действительного процесса истечения к теоретическому характеризуют коэффициент скорости сопла:

$$\varphi = \frac{w_{2д}}{w_2} \quad (5.14)$$

и коэффициент расхода:

$$\mu = \frac{m_{д}}{m}. \quad (5.15)$$

Значения этих коэффициентов зависят от конструкции сопла, чистоты обработки его рабочей поверхности и определяются опытным путем.

### **Схема и описание экспериментальной установки**

Эксперимент проводится на лабораторном стенде с использованием модуля, изображенного на рис. 5.2.



Рис. 5.2. Модуль НТЦ-22.05.1/5 «Изучение процесса адиабатного истечения газа через суживающееся сопло»

Экспериментальная установка (рис. 5.3) состоит из трубы, в которой вмонтированы диафрагма 8 для измерения расхода воздуха и исследуемое суживающееся сопло 5.

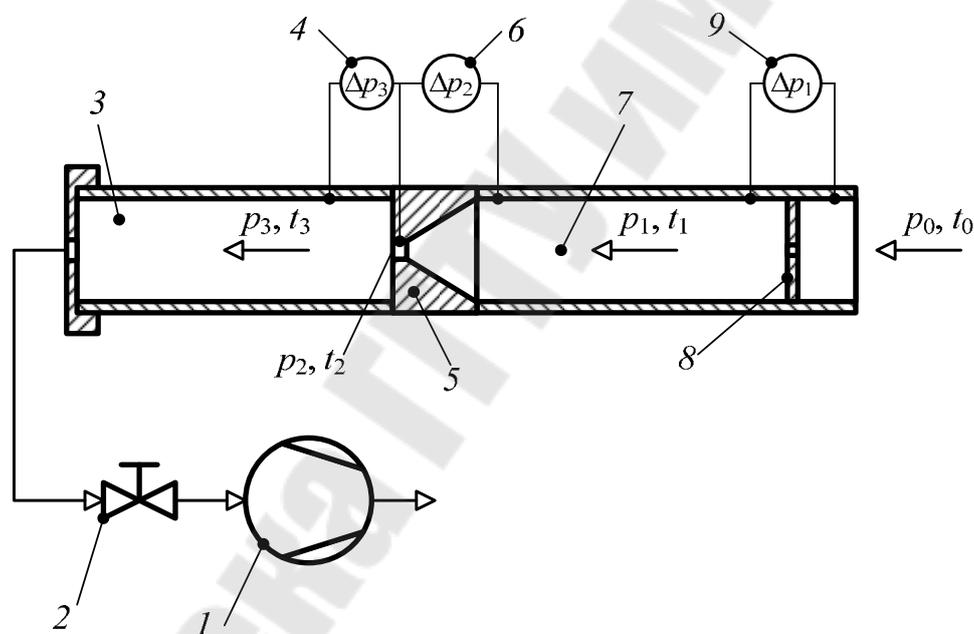


Рис. 5.3. Схема экспериментальной установки:

1 – воздушный компрессор; 2 – дроссель; 3 – камера низкого давления; 4, 6, 9 – дифференциальные манометры; 5 – сопло; 7 – камера высокого давления; 8 – мерная диафрагма

Один из концов трубы соединен через регулирующий дроссель 2 с воздушным компрессором 1, работа которого приводит к тому, что в экспериментальной трубе создается камера низкого давления 3 и камера высокого давления 7. При работе установки воздух засасывается из атмосферы через измерительную диафрагму 8. При этом перепад давления на диафрагме измеряется дифференциальным манометром 9,

показания которого высвечиваются на панели лабораторного стенда. После диафрагмы воздух с давлением  $p_1$  и температурой  $T_1$  поступает в камеру высокого давления 7, откуда через сопло 5 истекает в камеру низкого давления. Давление в камере низкого давления определяется с использованием показаний дифференциальных манометров 4 и 6.

### Порядок проведения измерений

1. Установить модуль НТЦ-22.05.1/5 «Изучение процесса адиабатного истечения газа через суживающееся сопло» (рис. 5.2) на перфорированную панель и закрепить поворотом крепежных рукояток во встречном направлении на четверть оборота. Подключить кабель модуля к разъему X11 на передней панели стенда.

2. Убедиться в том, что переключатели установлены в положения: SA1 – «выкл», SA2 (Насос-1) – «выкл», SA3 – «нижнее», SA4 (Насос-2) – «выкл», SA5 – «выкл», SA6 – «выкл», SA14 – min, SA15 – min, SA16 – min.

3. Включить автоматические выключатели QF1 и QF2 на панели стенда. Установить профиль индикации «L5». Конфигурация отображаемых на индикаторах параметров изображена на рис. 5.4.

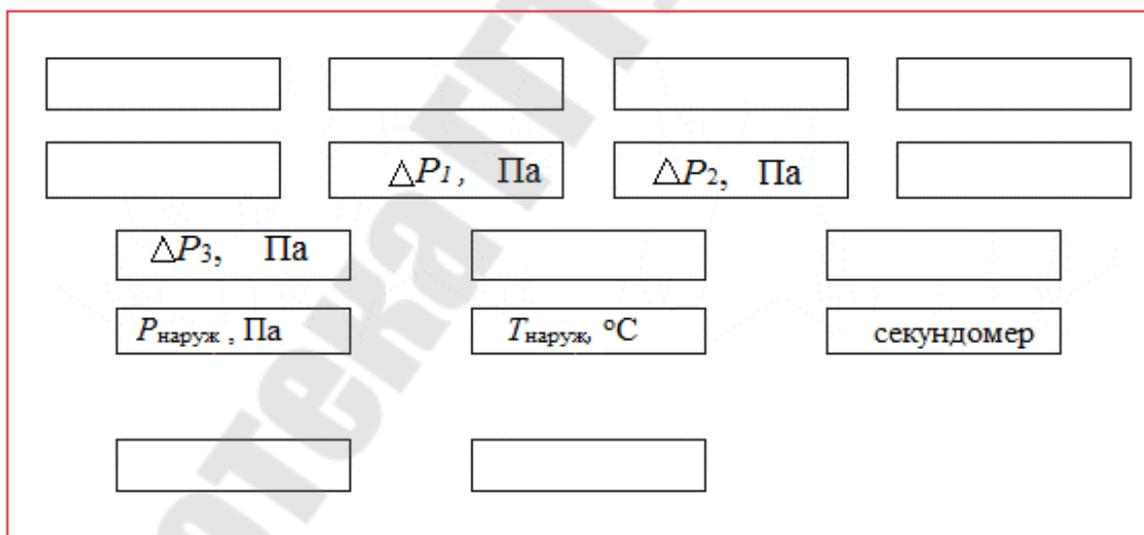


Рис. 5.4. Конфигурация параметров

4. При выполнении работы производится подключение вакуумнасоса. В работе вакуумнасос используется для создания вакуума – перед началом работы необходимо подключить трубку к штуцеру на установке и к патрубку для создания вакуума. Включение вакуумнасоса производится клавишным выключателем SA1. Величина разре-

жения контролируется по стрелочному вакуумметру на регуляторе расхода воздуха и устанавливается около 0,5 атм.

5. Дождаться, когда процесс можно будет считать установившимся (изменение давления будет колебаться около некоторого среднего значения). Зафиксировать показания приборов.

6. Снять показания приборов.

7. По окончании работы отключить вакуумнасос клавишным выключателем SA1.

### Обработка результатов измерений

Проведение расчетов определяется, используя табл. 5.1 и 5.2.

Таблица 5.1

#### Данные прямых измерений, параметров установки и справочных таблиц

Газ	Параметры		
	$\Delta P_1$ , кПа	$\Delta P_2 \cdot 10^{-5}$ , кПа	$\Delta P_3$ , Па
Воздух			
$P_{\text{атм}} =$	$\cdot 10^5$ Па	$t_{\text{атм}} =$	$^{\circ}\text{C}$
Диаметры: вход – 15 мм, сопло – 1 мм			

Таблица 5.2

#### Данные косвенных измерений (действительные параметры)

Наименование параметра	Значение
Плотность воздуха по состоянию перед диафрагмой: $\rho_v = \frac{P}{R(t + 273)}$ , кг/м <sup>3</sup> , где $R$ – характеристическая газовая постоянная воздуха, равная 287 Дж/(кг · К)	
Действительный расход воздуха через установку: $G_d = f \sqrt{\frac{1}{2} \rho_v \cdot \Delta P_1}$ , кг/с	
Действительная массовая скорость воздуха: $u_i = \frac{G_d}{f}$	
Давление в камере высокого давления: $p_1 = p_0 - \Delta p_1$	
Давление на срезе сопла: $p_2 = p_1 - \Delta p_2$	
Давление в камере низкого давления: $p_3 = p_2 - \Delta p_3$	
Коэффициент расширения на срезе сопла: $\beta = p_2 / p_1$	

Наименование параметра	Значение
Вывод о критическом или докритическом течении газа: $\beta > \beta_{кр}$ или $\beta < \beta_{кр}$	
<i>Расчет теоретических параметров</i>	
Теоретическая линейная скорость истечения $c_2$ : $c_2 = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} P_1 v_1 \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad v_1 = \frac{RT_1}{P_1}$	
Теоретическая плотность воздуха в выходном сечении сопла: $\rho_2 = \frac{1}{v_1} \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{k}}, \quad \text{кг/м}^3$	
Теоретическая массовая скорость истечения: $u_2 = c_2 \rho_2$ , кг/м <sup>2</sup> с	
Теоретический расход газа: $G = v_2 f_c$ , кг/с	
<i>Вывод о соотношении действительных и теоретических параметров</i>	
Коэффициент расхода: $\alpha = G_d / G$	
Отношение скоростей: $u / v_2$	

### Контрольные вопросы

1. Уравнение сплошности (неразрывности) потока и его физический смысл.
2. Уравнение первого закона термодинамики для потока и его физический смысл.
3. Уравнение скорости истечения при обратимом процессе с идеальным газом.
4. Уравнение для определения расхода газа при истечении.
5. Характер изменения скорости истечения и расхода от соотношения давлений после и до сопла теоретически и в реальных процессах.
6. Что такое критические параметры при истечении?
7. Чем отличается реальный адиабатный процесс истечения от идеального?

## Лабораторная работа № 6

# ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ОДНОСТУПЕНЧАТОГО КОМПРЕССОРА

### Цель работы:

1. Ознакомление с поршневым компрессором и его техническими характеристиками.
2. Практическое закрепление знаний по термодинамическим процессам в компрессоре.
3. Построение процессов компрессора в  $p-v$  и  $T-s$  диаграммах.
4. Определение степени сжатия, технической работы и других характеристик компрессора.

### Теоретическая часть

#### Одноступенчатый компрессор

Компрессором называется установка для сжатия газов. Конструктивно компрессоры подразделяются на объемные (статического сжатия за счет уменьшения объема газа) и лопаточные (динамического сжатия за счет преобразования кинетической энергии движущегося газа в потенциальную энергию давления). Так как с термодинамической точки зрения процессы в объемных и лопаточных компрессорах не отличаются, рассмотрим их на примере поршневого компрессора (рис. 6.1).

В цилиндре 2 движется поршень 1, совершающий возвратно-поступательное движение. При движении поршня вправо происходит всасывание газа 4–1 через открытый всасывающий клапан 3 при практически постоянном давлении  $p_1$ . После того как поршень дойдет до крайнего правого положения (нижней мертвой точки), процесс всасывания заканчивается, клапан 3 закрывается и поршень начинает двигаться влево. Происходит сжатие газа 1–2. Когда давление газа в цилиндре достигает значения, несколько превышающего давление в баллоне сжатого газа (ресивере), нагнетательный клапан 4 открывается и происходит нагнетание 2–3 сжатого газа в ресивер. Дойдя до крайнего левого положения (верхней мертвой точки), поршень вновь начинает двигаться вправо, и процесс повторяется.

В  $p-v$  диаграмме на рис. 1.1 показаны: работа всасывания  $l_{41}$  – вертикальная штриховка; работа сжатия  $l_{12}$  – косая штриховка и работа нагнетания  $l_{23}$  – горизонтальная штриховка. Сумма этих работ дает так называемую техническую работу компрессора:

$$l_T = l_{41} + l_{12} + l_{23} = \text{пл. 1-2-3-4-1.} \quad (6.1)$$

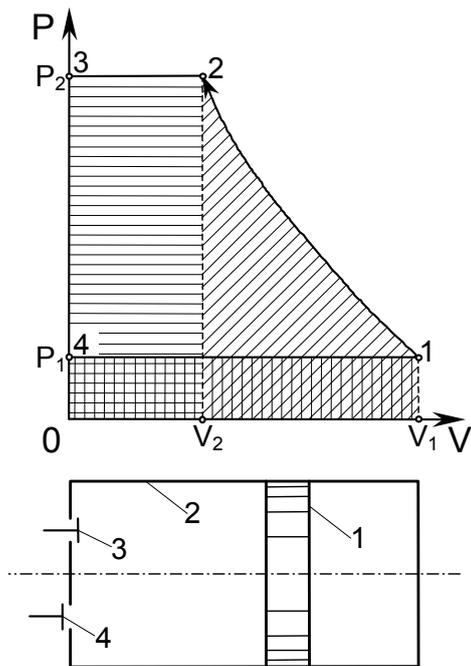


Рис. 6.1. Поршневой компрессор

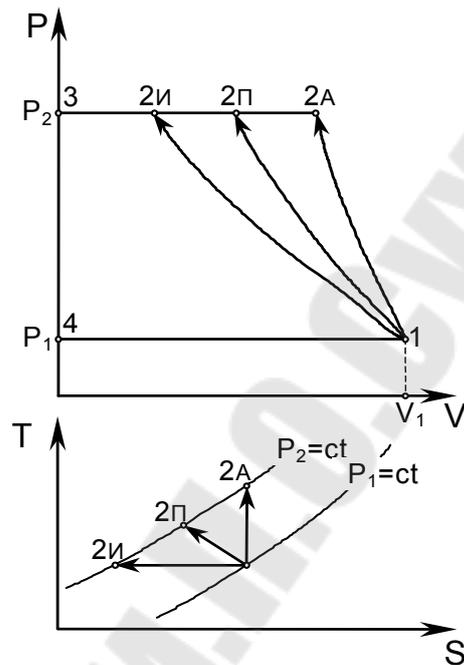


Рис. 6.2. Процессы сжатия в  $p$ - $v$  и  $T$ - $s$  диаграммах

Каждая составляющая технической работы в общем случае определяется по формуле

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv. \quad (6.2)$$

Считая всасывание и нагнетание изобарными процессами и подставляя работы  $l_{41}$ ,  $l_{12}$ ,  $l_{23}$ , определенные по формуле (6.2), в уравнение (6.1), после несложных преобразований можно получить общее выражение для технической работы:

$$l_T = \int_{p_1}^{p_2} v dp. \quad (6.3)$$

Можно представить три возможных термодинамических процесса сжатия в компрессоре (рис. 6.2): изотермический 1–2и, адиабатный 1–2а и политропный 1–2п. Так как техническая работа в  $p$ - $v$  диаграмме представляет собой площадь цикла 1-2-3-4-1 (6.1), то минимальная техническая работа будет при изотермическом сжатии, а максимальная – при адиабатном (рис. 6.2). Изотермическое сжатие можно представить при идеальном охлаждении компрессора, а адиабатное – для идеально изолированного компрессора (нет теплообмена между сжимаемым газом и окружающей средой). Но ни идеальное охлаждение, ни идеальную изоляцию осуществить невозможно, поэтому в реальном компрес-

соре сжатие газа происходит по политропе 1–2п, располагающейся между изотермой 1–2и и адиабатой 1–2а; очевидно, показатель этой политропы  $1 < n < k$ .

Из уравнения политропы:

$$pv^n = p_1v_1^n, \quad (6.4)$$

где левая часть соответствует любой точке на политропе, а правая часть – начальному состоянию газа (точка 1). Находя удельный объем  $v$  из формулы (6.4), подставляя его в уравнение (6.3), можно получить техническую работу политропного (реального) компрессора:

$$l_T = \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left[ 1 - (p_2 - p_1)^{\frac{n-1}{n}} \right]. \quad (6.5)$$

Или с учетом уравнения Клапейрона для идеального газа:

$$l_T = \frac{n}{n-1} RT_1 \left[ 1 - (p_2 - p_1)^{\frac{n-1}{n}} \right]. \quad (6.6)$$

#### *Реальный одноступенчатый компрессор*

В реальном компрессоре имеется так называемый вредный объем  $V_3$ , из-за которого не весь сжатый газ нагнетается в ресивер. Вредный объем – это объем зазора между днищем поршня в его крайнем левом положении (верхней мертвой точке) и головкой цилиндра с клапанами. Этот зазор необходим для безударной работы компрессора. На рис. 6.4 изображены термодинамические процессы реального одноступенчатого компрессора, где  $p_1$  и  $p_2$  – давления в окружающей среде и в ресивере. Сжатие газа 1–2 происходит до давления несколько выше  $p_2$ , необходимого для открытия нагнетательного клапана. После нагнетания 2–3 оставшийся во вредном объеме  $V_3$  газ расширяется до  $V_4$  при обратном ходе поршня. Для начала всасывания 4–1 давление в цилиндре должно стать несколько ниже атмосферного, что необходимо для открытия всасывающего клапана. Рабочий объем цилиндра, м<sup>3</sup>:

$$V_h = \frac{\pi d^2 S}{4}. \quad (6.7)$$

Это объем цилиндра между крайними положениями поршня (между ВМТ и НМТ). Здесь  $d$  – диаметр цилиндра, м;  $S$  – ход поршня, м. На рис. 6.4 представлена так называемая индикаторная диаграмма компрессора, которая снимается с помощью механического индикатора.

По ней с помощью планиметра определяется площадь индикаторной диаграммы  $f_i$ , представляющая собой индикаторную (внутреннюю) работу компрессора  $L_i$  за один оборот вала компрессора. Тогда индикаторная (внутренняя) мощность привода компрессора, Вт:

$$N_i = L_i n, \quad (6.8)$$

где  $L_i$  – индикаторная работа, Дж/об.;  $n$  – число оборотов вала компрессора, об./с.

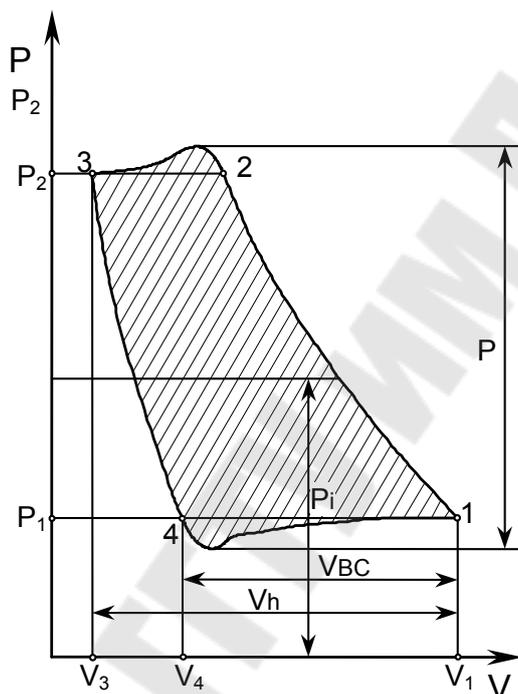


Рис. 6.3. Реальные процессы в одноступенчатом компрессоре

По определенным с помощью механического индикатора площади диаграммы  $f_i$ , мм<sup>2</sup>, и рабочего объема цилиндра  $V_h$ , мм, определяется среднее индикаторное давление газа в цилиндре  $p_i$ , МПа:

$$p_i = f_i \frac{m}{V_h}, \quad (6.9)$$

где  $m = 0,1$  МПа/мм – масштаб пружины механического индикатора.

*Основные характеристики компрессора:*

Степень сжатия компрессора:

$$\varepsilon = \frac{P_2}{P_1}, \quad (6.10)$$

где давление сжатого воздуха, МПа:

$$p_2 = p_1 + pm, \quad (6.11)$$

где  $p$  – максимальная высота индикаторной диаграммы, мм (рис. 6.4);  
 $m = 0,1$  МПа/мм – масштаб пружины механического индикатора.

Начальное давление воздуха перед компрессором, МПа:

$$p_1 = \frac{B}{7500}, \quad (6.12)$$

где  $B$  – давление окружающей среды по барометру, мм рт. ст.;  
1 МПа = 7500 мм рт. ст.

Производительность компрессора при  $p_1, t_1, m^3/c$ :

$$V = \frac{(V_{\text{кон}} - V_{\text{нач}})}{\tau}, \quad (6.13)$$

где

$$V_{\text{нач}} = P_{\text{а нач}} \frac{V_p}{P_1}; \quad (6.14)$$

$$V_{\text{кон}} = P_{\text{а кон}} \frac{V_p}{P_1}. \quad (6.15)$$

Начальный и конечный объем воздуха в ресивере, приведенные к условиям на входе в компрессор:

$V_p = 0,024 \text{ м}^3$  – объем ресивера;

$$P_{\text{а нач}} = P_{\text{нач}} + \frac{B}{7500}; \quad (6.16)$$

$$P_{\text{а кон}} = P_{\text{кон}} + \frac{B}{7500}, \quad (6.17)$$

где  $P_{\text{а нач}}$  и  $P_{\text{а кон}}$  – абсолютные начальное и конечное давления воздуха в ресивере, МПа;  $P_{\text{нач}}$  и  $P_{\text{кон}}$  – избыточные давления (по манометру) в ресивере на начало и конец измерений, МПа;  $\tau$  – время работы компрессора, с.

Индикаторная мощность компрессора, Вт:

$$N_i = L_i n, \quad (6.18)$$

где  $n$  – измеренное число оборотов компрессора, об./с.

Эффективная мощность привода компрессора, Вт:

$$N_e = \sqrt{3}IU \cos \varphi, \quad (6.19)$$

где  $I$ ,  $U$ , – измеренные питающие электронагреватель ток, А, и напряжение, В;  $\cos \varphi = 0,8$ .

Механический КПД компрессора:

$$\eta_m = \frac{N_i}{N_e}. \quad (6.20)$$

Коэффициент подачи компрессора представляет собой отношение действительной производительности  $V$  к теоретической.

$$\lambda = \frac{4V}{[\pi d^2 n S]}, \quad (6.21)$$

где  $d$  – диаметр цилиндра, м;  $n$  – число оборотов компрессора, об./с;  $S$  – ход поршня, м.

Изотермический КПД компрессора представляет собой отношение мощностей привода изотермического  $N_{из}$  и реального  $N_i$  компрессоров:

$$\eta_{из} = \frac{N_{из}}{N_i}, \quad (6.22)$$

где 
$$N_{из} = P_1 V \ln \varepsilon; \quad (6.23)$$

$$N_i = N_e \eta_m; \quad (6.24)$$

$$\eta_{из} = \frac{P_1 V \ln \varepsilon}{(N_e \eta_m)}. \quad (6.25)$$

По величине изотермического КПД можно судить о совершенстве реального компрессора. Мощность привода теоретического изотермического компрессора минимальна, поэтому чем ближе  $\eta_{из}$  к единице, тем совершеннее реальный компрессор.

### Схема и описание установки

Компрессор (рис. 6.5) состоит из следующих основных сборочных единиц и деталей: блока поршневого, ресивера (воздухосборника) 1, прессостата 2, манометра 3, воздухопровода сброса давления 4, нагнета-

тельного воздухопровода 5, клапана предохранительного 6, клапана обратного 7, крана слива конденсата 8, колес и амортизаторов 9, регулятора давления воздуха, подаваемого потребителю 10.

Блок поршневой – поршневого типа, одноступенчатый с воздушным охлаждением – предназначен для выработки сжатого воздуха. Смазка трущихся поверхностей деталей блока поршневого осуществляется разбрызгиванием масла. Заливка масла в картер производится через отверстие в крышке картера, слив масла – через отверстие в днище картера, закрытое пробкой.

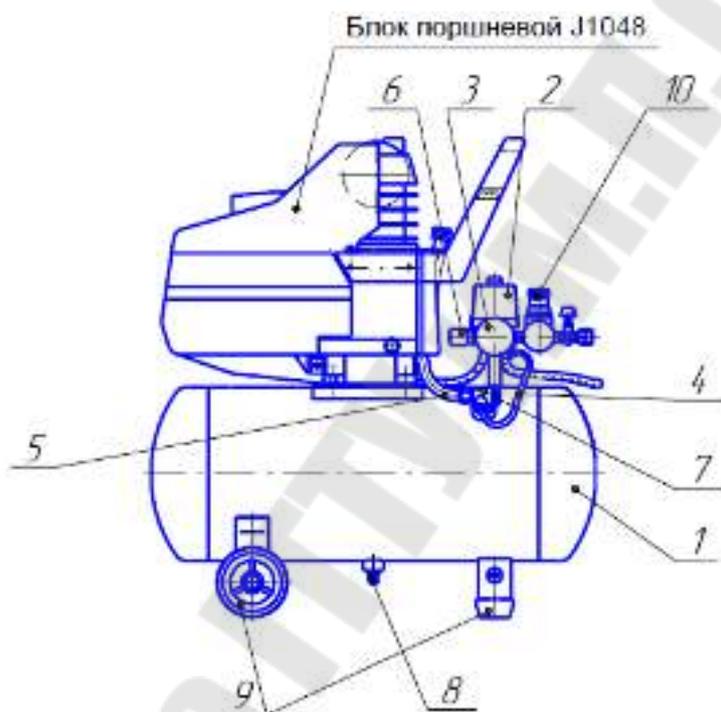


Рис. 6.4. Схема компрессорной установки

Ресивер (воздухосборник) 1 служит для сбора сжатого воздуха, устранения пульсации давления, отделения конденсата и масла. Ресивер является также корпусом, на котором смонтированы узлы и детали компрессора. Ресивер имеет штуцеры для установки прессостата 2, обратного клапана 7, крана слива конденсата 8.

Электродвигатель входит в состав блока поршневого и составляет единое целое.

Прессостат 2 служит для обеспечения работы компрессора в автоматическом режиме, поддержания давления в ресивере. Воздухопровод сброса давления 4 служит для сбрасывания сжатого воздуха из нагнетательного воздухопровода 5 после остановки блока поршневого с целью облегчения его последующего запуска.

Клапан предохранительный 6 служит для ограничения максимального давления в ресивере и отрегулирован на давление открывания, превышающее давление нагнетания не более, чем на 10 %. Обратный клапан 7 обеспечивает подачу сжатого воздуха только в направлении от блока поршневого к ресиверу. Кран слива конденсата 8 служит для удаления конденсата из ресивера. Манометр 3 предназначен для контроля давления в ресивере.

Основные характеристики компрессоров приведены в табл. 6.1 Диаметр поршня 10 см, ход поршня 8 см.

Таблица 6.1

### Технические характеристики компрессоров

Наименование показателя	Значение показателя	
	СБ4/С-24.Ј1048	СБ4/С-50.Ј1048
Число ступеней сжатия	1	
Число цилиндров	1	
Производительность (по всасыванию), л/мин, м/ч	250(15)	
Давление сжатого воздуха, МПа, кг/см	0,8 (8)	
Число оборотов на валу компрессора, об./мин	2800	
Напряжение питания, В	220+22	
Номинальная мощность двигателя, кВт	1,9	
Номинальный заправочный объем масла, л	0,180	
Вместимость ресивера, л, не менее	24	50
Габаритные размеры, мм, не более:		
– длина	600	850
– ширина	280	400
– высота	680	740
Масса, кг, не более	26	38

### Порядок выполнения работы

1. Убедиться в исправности оборудования, проверить заземление, при необходимости стравить воздух из ресивера.
2. Включить компрессор в сеть.
3. Отрегулировать регулятор давления на выходе компрессора на 3–5 бар.
4. Включить компрессор. Засечь время, необходимое для создания в ресивере заданного давления.

5. Замерить токовыми клещами силу тока и  $\cos\phi$ .
6. Выключить компрессор.
7. Сравнить избыточное давление в ресивере.

### Обработка результатов измерения

Результаты измерений занести в табл. 6.2.

Обработать опытные данные, используя формулы в табл. 6.3.

Таблица 6.2

#### Результаты измерений

№ п/п	Характеристика	Обозначение	Размерность	Величина	Примечание
1	Давление окружающего воздуха	B	мм рт. ст.		Барометр
2	Температура окружающего воздуха	$t_1$	°C		Термометр
3	Начальное давление воздуха в ресивере	$P_{нач}$	МПа		Манометр
4	Конечное давление воздуха в ресивере	$P_{кон}$	МПа		Манометр
5	Время работы компрессора	$\tau$	с		Секундомер
6	Сила тока	$I$	A		Токовые клещи
7	Напряжение	$U$	B		Вольтметр

Таблица 6.3

#### Расчет основных характеристик компрессора

№ п/п	Характеристика	Формула	Величина	Размерность
1	Абсолютное атмосферное давление	$P_1 = B/7500$		МПа
2	Абсолютное начальное давление воздуха в ресивере	$P_{a_{нач}} = P_{нач} + B/7500$		МПа
3	Начальный приведенный объем воздуха в ресивере	$V_{нач} = P_{a_{нач}} V_p / P_1$		м <sup>3</sup>
4	Абсолютное конечное давление воздуха в ресивере	$P_{a_{кон}} = P_{кон} + B/7500$		МПа
5	Конечный приведенный объем воздуха в ресивере	$V_{кон} = P_{a_{кон}} V_p / P_1$		м <sup>3</sup>

№ п/п	Характеристика	Формула	Величина	Размерность
6	Производительность компрессора	$V = (V_{\text{кон}} - V_{\text{нач}}) / \tau$		м <sup>3</sup> /с
7	Среднее индикаторное давление	$p_i = f_i m / V_h$		МПа
8	Индикаторная работа ступени	$L_i = P_i V (1 - a)$		Дж/об.
9	Индикаторная мощность компрессора	$N_i = L_i n$		Вт
10	Эффективная мощность привода компрессора	$N_e = \sqrt{3} I U \cos \varphi$		Вт
11	Механический КПД компрессора	$\eta_m = N_i / N_e$		–
12	Изотермический КПД компрессора	$\eta_{\text{из}} = P_1 V \ln \varepsilon / (N_e \eta_m)$		–

### Контрольные вопросы

1. Компрессор. Типы компрессоров.
2. Принцип действия одноступенчатого поршневого компрессора.
3. Идеальная и реальная диаграммы поршневого компрессора.
4. Многоступенчатые компрессоры. Диаграмма сжатия в многоступенчатом компрессоре.
5. Индикаторные и эффективные давление и мощность.
6. КПД компрессоров.
7. Работа сжатия в поршневых компрессорах.

## Лабораторная работа № 7

# ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

**Цель работы:** исследование процессов, протекающих в цилиндре двигателя внутреннего сгорания (ДВС) с воспламенением от сжатия (дизеля). Определение характеристик термодинамического цикла.

### Теоретическая часть

Все современные поршневые двигатели внутреннего сгорания разделяются на три группы: 1) с быстрым сгоранием топлива при постоянном объеме; 2) с постепенным сгоранием топлива при постоянном давлении; 3) со смешанным сгоранием топлива частично при постоянном объеме и частично при постоянном давлении.

При исследовании идеальных термодинамических циклов поршневых двигателей внутреннего сгорания обычно определяют количество подведенной и отведенной теплоты, основные параметры состояния рабочего тела в типичных точках цикла, причем температуры в промежуточных точках вычисляют как функции начальной температуры газа; вычисляют термический КПД цикла по основным характеристикам и производят анализ термического КПД.

Основными характеристиками или параметрами любого цикла двигателя внутреннего сгорания являются следующие безразмерные величины:

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} - \text{степень сжатия, представляющая собой отношение}$$

начального удельного объема рабочего тела к его удельному объему в конце сжатия;

$$\lambda = \frac{p_3}{p_2} - \text{степень повышения давления, представляющая отношение}$$

давлений в конце и в начале изохорного процесса подвода теплоты;

$$\rho = \frac{V_3}{V_2} - \text{степень предварительного расширения, представляющая}$$

собой отношение объемов в конце и в начале изобарного процесса подвода теплоты.

Исследование работы реального поршневого двигателя целесообразно производить по диаграмме, в которой дается изменение давления в цилиндре в зависимости от положения поршня за весь цикл.

Такую диаграмму, снятую с помощью специального прибора индикатора, называют *индикаторной диаграммой*.

Рассмотрим идеальный цикл двигателя с постепенным сгоранием топлива при постоянном давлении, т. е. цикл с подводом теплоты при постоянном давлении. На рис. 7.1 изображен этот цикл в  $p$ - $v$  диаграмме. Осуществляется он следующим образом. Газообразное рабочее тело (воздух) с начальными параметрами  $p_1$ ,  $v_1$  и  $T_1$  сжимается по адиабате 1–2; затем телу по изобаре 2–3 сообщается некоторое количество теплоты  $q_1$ . От точки 3 рабочее тело расширяется по адиабате 3–4. И наконец, по изохоре 4–1 рабочее тело возвращается в первоначальное состояние, при этом в теплоприемник отводится теплота  $q_2$ .

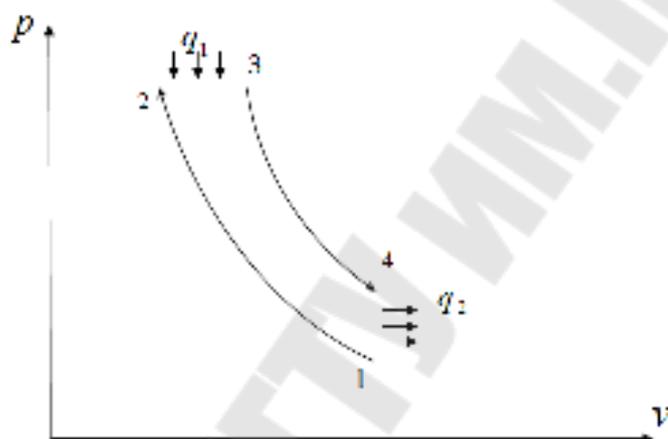


Рис. 7.1. Цикл Дизеля в  $p$ - $v$  диаграмме

### Схема и описание лабораторной установки

Эксперимент проводится на установке (рис. 7.2), созданной на базе дизельного двигателя МД-6, имеющего следующие данные:

Число цилиндров.....	1
Число тактов.....	4
Номинальная мощность, кВт, л. с.....	4,4 (6,0)
Частота вращения, 1/мин.....	3000
Диаметр цилиндра, мм.....	80
Ход поршня, мм.....	75
Степень сжатия (геометрическая), $\epsilon$ .....	19,3

Двигатель имеет воздушное охлаждение.

Дизель 1 запускается с помощью шнура. В качестве нагружающего устройства использован генератор постоянного тока 2.

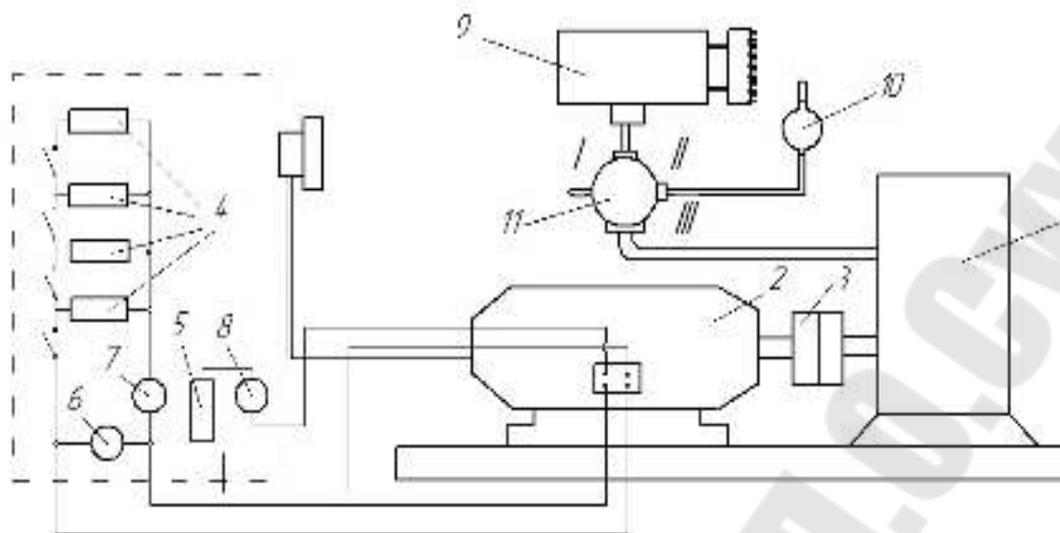


Рис. 7.2. Схема лабораторной установки

Электрическая мощность генератора регулируется включением в цепь якоря электрических нагревателей 4 и изменением тока в обмотке возбуждения при помощи реостата 5. Напряжение и сила тока в цепи якоря измеряются вольтметром 6 и амперметром 7, по показаниям которых определяется мощность генератора. Сила тока в обмотке возбуждения контролируется при помощи амперметра 8.

Топливо поступает к двигателю из топливного бака 9, снабженного указателем уровня. Расход топлива двигателя во время опыта измеряется при помощи стеклянного объемного измерителя 10. Режимы работы топливной системы регулируются переключением трехходового крана 11. Положение I – топливо поступает из бака к двигателю; II – топливо поступает к двигателю и одновременно заполняет измеритель; III – топливо поступает к двигателю только из измерителя. Температура выпускных газов измеряется с помощью термопары, установленной на выхлопном тракте двигателя. Давление окружающей среды измеряется барометром.

### Порядок выполнения работы

Измерения проводятся при установившемся режиме работы двигателя, задаваемом внешней нагрузкой и частотой вращения  $n$  (1/мин) вала двигателя.

Перед началом испытания двигатель прогревается в течение 10–15 мин на холостом ходу, а затем постепенно нагружается до рабочей нагрузки. Тепловой режим двигателя в процессе эксперимента

должен быть стационарным. Основным внешним признаком того, что двигатель вышел на установившийся рабочий режим, является неизменность во времени температуры выпускных газов.

В опыте одновременно измеряются следующие параметры, записываемые в журнал наблюдений по форме.

Таблица 7.1

### Результаты измерений

№	Частота вращения двигателя, $n$ , 1/мин	Сила тока, $I$ , А	Напряжение, $V$ , В	Расход топлива, $B$ , кг/с	Барометрическое давление, $P_0$ , кПа	Температура поступающего воздуха, $t_1$ , °С	Температура выпускных газов, $t_{в.г}$ , °С

### Обработка результатов измерений

*Определение характеристик двигателей и топлива*

1. Объем цилиндра, л, описываемый поршнем (рабочий объем цилиндра), подсчитывается по формуле

$$V_h = \frac{1}{4} \pi D^2 S 10^{-6}, \quad (7.1)$$

где  $D$  и  $S$  – диаметр цилиндра и ход поршня, мм.

2. Объем камеры сжатия (положение поршня в верхней мертвой точке):

$$V_c = V_2 = \frac{V_h}{\varepsilon - 1}. \quad (7.2)$$

Объем цилиндра в нижней мертвой точке ( $V_1$ ):

$$V_1 = V_2 + V_h \text{ или } V_1 = \varepsilon V_2. \quad (7.3)$$

В тепловом расчете двигателя внутреннего сгорания обычно используют низшую теплоту сгорания топлива  $Q_H$ , кДж/кг. Последняя может быть подсчитана по формуле Менделеева:

$$Q_H^P = 339,5C^P + 1256H^P - 109(O^P - S^P) - 25,8(9H^P + W^P). \quad (7.4)$$

В этой формуле химические элементы  $C^P$ ,  $H^P$ ,  $O^P$ ,  $S^P$  и влага  $W^P$ , входящие в топливо, выражены в %. Среднему элементарному массовому составу топлива соответствуют значения  $C^P = 86\%$ ;  $H^P = 13\%$ ;  $O^P = 1\%$ , а содержанием серы  $S^P$  и влаги  $W^P$  в дизельных топливах обычно пренебрегают.

Мощность подведенной теплоты  $Q_1$ , кВт, отсчитывается по низшей теплотворной способности и массовому расходу топлива:

$$Q_1 = BQ_H. \quad (7.5)$$

*Определение характеристик термодинамического цикла*

Давление и температура воздуха в конце адиабатного сжатия подсчитываются по уравнению адиабаты:

$$P_2 = P_1 \varepsilon^k; \quad (7.6)$$

$$T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1}, \quad (7.7)$$

где  $k = 1,4$  – показатель адиабаты;  $P_1$  и  $T_1$  – давление и температура воздуха в начале сжатия в цилиндрах, причем  $P_1 = P_0$ .

Максимальное давление цикла  $P_3 = P_2$  и температура в конце изобарного подвода теплоты:

$$T_3 = \frac{P_3 v_3}{R}; \quad v_3 = \left( \frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{1}{k}} v_4; \quad v_4 = v_1; \quad p_4 = \frac{RT_4}{v_4}. \quad (7.8)$$

Теплота подводится к рабочему телу в процессе 2–3 ( $P = \text{const}$ ). В соответствии с первым законом термодинамики, кВт:

$$Q_1 = Mc_p (T_3 - T_2), \quad (7.9)$$

где  $M = \frac{P_1 V_1 n i}{60 R T_1}$  – массовый расход рабочего тела, кг/с, участвующего в термодинамическом цикле;  $n$  – частота вращения вала на исследуемом режиме, 1/мин;  $i$  – число цилиндров;  $R$  – газовая постоянная рабочего тела, кДж/(кг · К);

Теплота отводится к рабочему телу в процессе 4–1 ( $V = \text{const}$ ). В соответствии с первым законом термодинамики, кВт:

$$Q_2 = Mc_v (T_4 - T_1). \quad (7.10)$$

Термический КПД  $\eta_t$ , подсчитывается по формуле

$$\eta_t = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}. \quad (7.11)$$

### Контрольные вопросы

1. На какие группы делятся поршневые двигатели внутреннего сгорания?
2. Дать определение основным характеристикам циклов.
3. Как осуществить рабочий процесс в ДВС с быстрым сгоранием топлива при  $V = \text{const}$ , какое топливо применяют, почему нельзя применять высокие степени сжатия?
4. Как осуществить рабочий процесс в ДВС с постепенным сгоранием топлива при  $P = \text{const}$  и какие способы подачи топлива применяют?
5. Дать описание идеального цикла ДВС со смешанным подводом теплоты.
6. Физический смысл индикаторного давления.

## Лабораторная работа № 8

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИКЛА ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ

**Цель работы:** исследование физических процессов цикла холодильной машины в сплит-системе.

### Теоретическая часть

*Холодильная машина* – устройство, служащее для отвода теплоты от охлаждаемого тела при температуре более низкой, чем температура окружающей среды. Холодильная машина используется для получения температур от 10 до  $-150$  °С.

В холодильной технике находят применение несколько систем: парокompрессионные, абсорбционные, парозежекторные и воздушно-расширительные. Их работа основана на том, что рабочее тело (холодильный агент) за счет затраты внешней работы совершает обратный круговой термодинамический процесс (холодильный цикл).

В парокompрессионных, абсорбционных и парозежекторных холодильных машинах для получения эффекта охлаждения используют кипение низкокипящих жидкостей. В воздушно-расширительных холодильных машинах охлаждение достигается за счет расширения сжатого воздуха в детандере.

Парокompрессионные холодильные машины – наиболее распространенные и универсальные холодильные машины.

Основными элементами машин данного типа являются испаритель, компрессор, конденсатор и терморегулирующий (дрессельный) вентиль – ТРВ, которые соединены трубопроводом, снабженным запорной, регулирующей и предохранительной арматурой. Ко всем элементам холодильной машины предъявляется требование высокой герметичности.

В зависимости от вида холодильного компрессора парокompрессионные машины подразделяются на поршневые, турбокompрессионные, ротационные и винтовые.

В парокompрессионной холодильной машине (рис. 8.1) осуществляется замкнутый цикл циркуляции хладагента. В испарителе хладагент кипит (испаряется) при пониженном давлении и низкой температуре. Необходимая для кипения теплота отнимается от охлаждаемого тела, вследствие чего его температура понижается (вплоть до температуры кипения хладагента). Образовавшийся пар отсасывается ком-

прессором, сжимается в нем до давления конденсации и подается в конденсатор, где охлаждается водой или воздухом. Вследствие отвода теплоты от пара он конденсируется. Полученный жидкий хладагент через ТРВ, в котором происходит снижение его температуры и давления, возвращается в испаритель для повторного испарения, замыкая таким образом цикл работы машины. Для повышения экономической эффективности холодильной машины (снижения затрат энергии на единицу отнятого от охлаждаемого тела количества теплоты) иногда перегревают пар, всасываемый компрессором, и переохлаждают жидкость перед дросселированием. По этой же причине для получения температур ниже  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  используют многоступенчатые или каскадные холодильные машины.

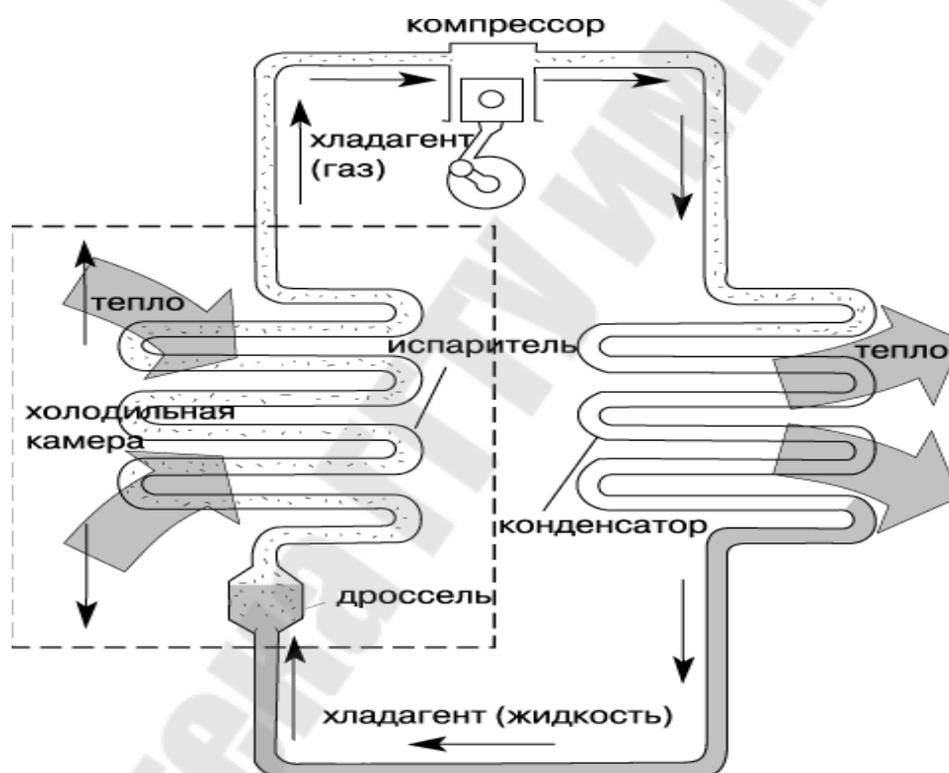


Рис. 8.1. Схема парокompрессионной холодильной машины

### Схема установки

Лабораторная установка представляет собой сплит-систему, схема которой изображена на рис. 8.2.

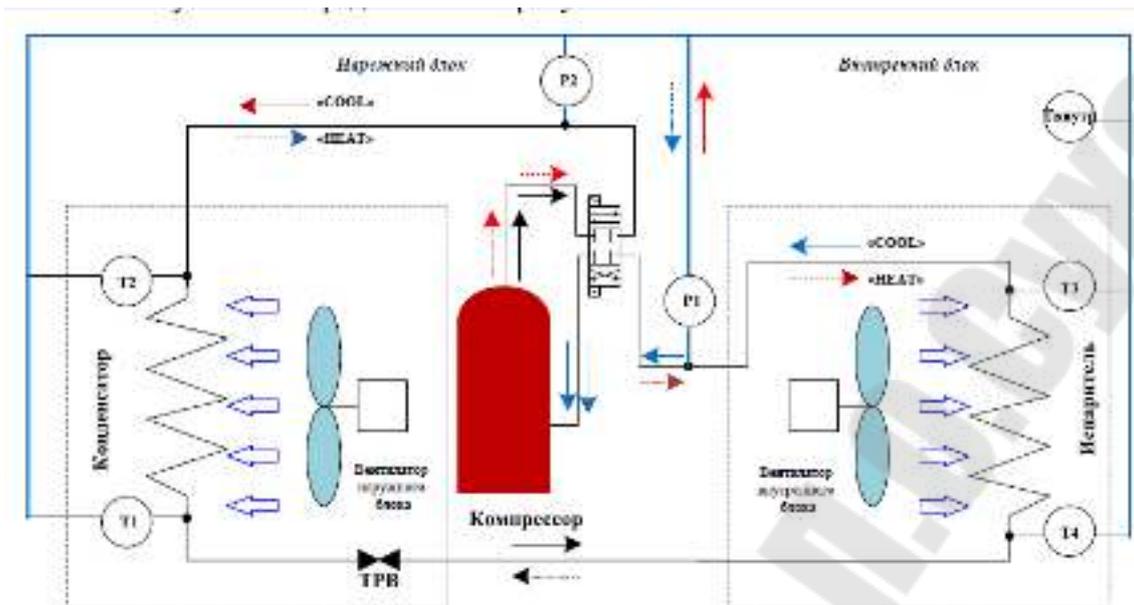


Рис. 8.2. Схема лабораторной установки

### Порядок выполнения работы

1. Установить режим работы сплит-системы «COOL» и задать температуру  $T_{\text{внутр}}$  на  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  меньше температуры  $T_{\text{нар}}$  с помощью пульта кондиционера и провести измерения затраченной энергии для охлаждения воздуха в боксе силового агрегата.

2. Включить стенд автоматическими выключателями QF1. Записать начальные показания расхода электроэнергии на счетчике SW1. Установить тумблер SA1 в положение « $T_{\text{внутр}}$ ; Влажность» и снять показания  $T_{\text{нар}}$ ,  $T_{\text{внутр}}$  и влажности в исследуемом боксе на силовом агрегате.

3. Включить кондиционер и задать с помощью его пульта управления температуру на  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ниже температуры  $T_{\text{нар}}$ . Записать время начала эксперимента.

4. При выходе установки на рабочий режим (температура  $T_2$  достигает максимального установившегося значения) с помощью анемометра произвести измерение температуры воздуха на выходе вентилятора наружного блока и расход воздуха через конденсатор.

5. По достижении  $T_{\text{внутр}}$  равной заданной на пульте управления снять показания термометров  $T_1$ – $T_4$  при работающем компрессоре кондиционера и показания температуры  $T_{\text{внутр}}$  и влажности внутри бокса силового агрегата.

6. Установить тумблер SA1 в положение «P1, P2» и снять показания величины давлений фреона на входе и выходе компрессора.

7. Отключить кондиционер с помощью его пульта управления и снять показания счетчика SW1 и зафиксировать время окончания эксперимента.

8. Все данные занести в таблицу.

### Результаты измерений

$T_{\text{внутр}},$ °C	$T_{\text{нар}},$ °C	$T_1,$ °C	$T_2,$ °C	$T_3,$ °C	$T_4,$ °C	$P_1,$ МПа	$P_2,$ МПа	$N_{\text{к}},$ кВт	$\omega,$ м/с

9. По полученным данным построить цикл работы холодильной машины и определить ее основные характеристики.

### Обработка полученных результатов

1. По параметрам хладагента (R404a) строим цикл холодильной установки в  $\lg p-h$  координатах.

2. По  $\lg p-h$  диаграмме определяем основные параметры характерных точек.

3. Удельная массовая холодопроизводительность, кДж/кг:

$$q_0 = h_1 - h_4. \quad (8.1)$$

4. Удельная работа компрессора, кДж/кг:

$$l_{\text{к}} = h_2 - h_1. \quad (8.2)$$

5. Холодильный коэффициент:

$$\varepsilon = \frac{q_0}{l_{\text{к}}}. \quad (8.3)$$

6. Тепловая нагрузка испарителя, кВт:

$$Q_{\text{и}} = c_{\text{в}} G_{\text{в}} (t'_{\text{и}} - t''_{\text{и}}). \quad (8.4)$$

7. Расход хладагента, кг/с.

$$G = \frac{Q_{\text{и}}}{q_0}. \quad (8.5)$$

8. Объемная подача компрессора, м<sup>3</sup>/с.

$$V_k = Gv_1, \quad (8.6)$$

где  $v_1$  – удельный объем хладагента в точке 1.

9. Мощность компрессора в идеальном изоэнтропном процессе, кВт:

$$N_k = Gl_k, \quad (8.7)$$

10. Эксергетический КПД установки:

$$\eta_e = \varepsilon \frac{T_0 - T_i^{cp}}{T_0}, \quad (8.8)$$

где  $T_i^{cp}$  – средняя температура воздуха в испарителе, °С.

### Контрольные вопросы

1. Принципиальная схема парокompрессионной холодильной установки (ПКХУ).
2. Цикл ПКХУ в  $T-s$  и  $p-h$  диаграмме.
3. К чему приводит переохлаждение жидкого хладагента после конденсатора?
4. К чему приводит перегрев пара хладагента перед компрессором?
5. Основные параметры, характеризующие работу ПКХУ.
6. Что такое эксергетический КПД установки?
7. Описать схему опытной установки.
8. Как определяются: удельная массовая холодопроизводительность, удельная работа компрессора, тепловая нагрузка конденсатора и испарителя, расход хладагента массовый и объемный, мощность компрессора, эксергетический КПД?

## Лабораторная работа № 9

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВОГО НАСОСА

**Цель работы:** изучить принцип действия теплового насоса, его технические характеристики и области применения; исследование работы сплит-системы в качестве теплового насоса.

#### Теоретическая часть

Тепловой насос – это установка, предназначенная для передачи теплоты от источника с низкой температурой к нагреваемому теплоносителю с более высокой температурой.

Применение тепловых насосов имеет целый ряд положительных особенностей. Во-первых, в качестве источников низкопотенциальной теплоты, как правило, служат ее природные аккумуляторы: грунтовые породы, грунтовые воды, водоемы, атмосферный воздух. Следовательно, использование тепловых насосов не наносит вреда экологической системе. Также тепловые насосы могут применяться при наличии тепловых источников в виде сброса сточных вод, охлаждающей воды градирен ТЭЦ, дымовых газов заводов и электростанций, охлаждающего масла трансформаторных подстанций, при кондиционировании помещений и т. д. Во-вторых, применение тепловых насосов позволяет экономить дорогостоящие первичные теплоносители.

Тепловые насосы по назначению могут быть отопительными и утилизационными. Отопительные служат для целей отопления, при этом они используют энергию окружающей среды с температурой  $t_{oc}$  более низкой, чем температура отапливаемого помещения  $t_{внутр}$ . Утилизационные насосы позволяют повышать температуру потока до такого уровня, при котором его можно применять в технологическом процессе.

По принципу действия различают парокompрессионные и абсорбционные тепловые насосы.

В качестве источника низкопотенциального тепла можно использовать промышленные и очищенные бытовые стоки, воду технологических циклов, тепло грунтовых, артезианских, термальных вод, воды естественных водоемов (рек, озер, морей), тепло, получаемое при очистке дымовых газов, а также любых других сбросных тепловых потоков.

Принцип действия теплового насоса можно рассматривать на примере обратного цикла холодильной установки.

Схема теплового насоса изображена на рис. 9.1.

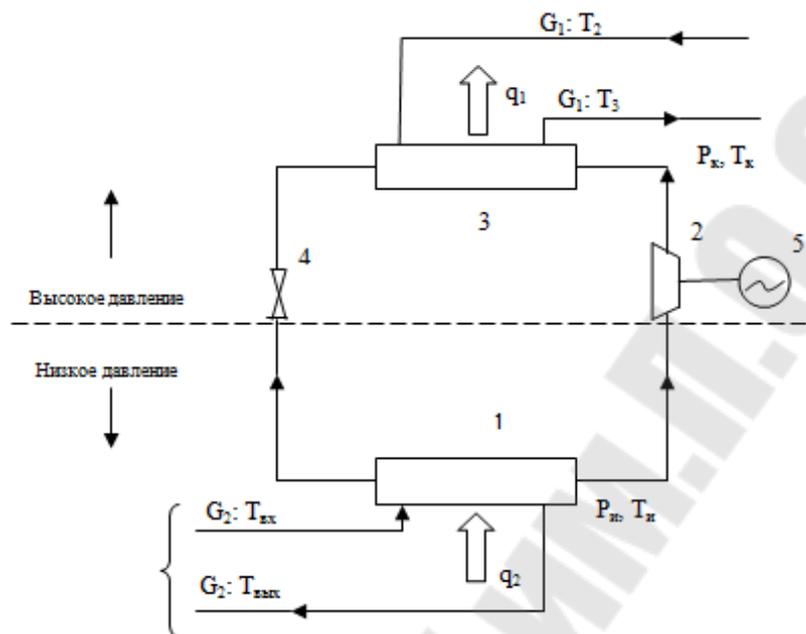


Рис. 9.1. Схема теплового насоса

Рассмотрим процессы изменения состояния рабочего тела массой 1 кг в тепловом насосе. В испарителе 1 жидкий хладагент испаряется при низком давлении  $p_0$  и температуре  $t_0$  за счет подвода теплоты  $q_2$  от потока среды с температурой  $t_{вх}$ , поступающей на охлаждение в испаритель 1. Компрессор 2, вращаемый электродвигателем 5, всасывает и сжимает пары хладагента, температура которого повышается. В конденсаторе 3 пар конденсируется при давлении  $p_к$  и температуре  $t_к$  с переносом теплоты  $q_1$  к теплоносителю. Далее сжиженный хладагент проходит через дроссельный вентиль 4 в испаритель 1. Затем цикл повторяется.

Термодинамические процессы, протекающие в цикле теплового насоса, изображены на диаграмме в  $T-s$  координатах на рис. 9.2.

На этой диаграмме процессу сжатия пара в компрессоре соответствует адиабата 1–2. На выходе из компрессора пар становится перегретым и его состояние характеризуется параметрами точки 2. Из компрессора пар при постоянном давлении (изобара 2–3–4) поступает в конденсатор. На участке 3–4 происходит фазовый переход и пар полностью превращается в жидкость. Пропускание жидкого хладагента через дроссельный вентиль сопровождается понижением температуры

и давления. Процесс дросселирования является сугубо необратимым, поэтому на диаграмме он изображен пунктирной линией 4–5. Попадая в испаритель, хладагент испаряется, так как к нему подводится теплота  $q_2$  от охлаждаемого теплоносителя или среды.

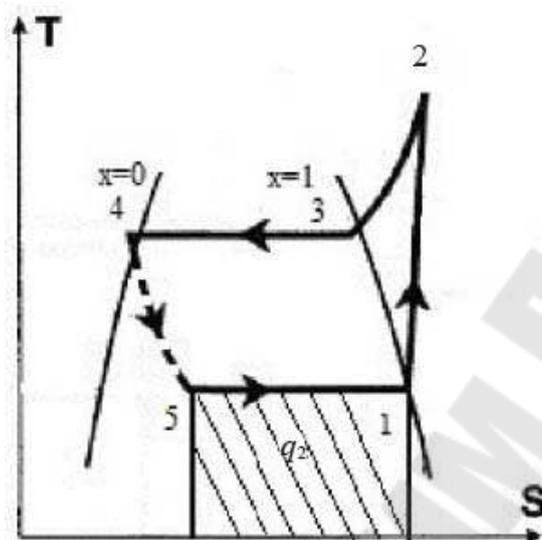


Рис. 9.2.  $T$ - $s$  диаграмма цикла теплового насоса

Эффективность теплового насоса оценивается отопительным коэффициентом  $\mu$ , представляющим собой отношение количества теплоты  $q_1$ , передаваемое нагреваемому объекту, к величине работы:

$$\mu = \frac{q_1}{q_1 - q_2} = \frac{q_1}{l_{\text{ц}}}, \quad (9.1)$$

Полученная величина всегда больше 1. Это означает, что с помощью теплового насоса затраченная на привод компрессора работа расходуется на превращение теплоты низкого температурного потенциала в теплоту более высокого температурного потенциала. Отопительные коэффициенты реальных тепловых насосов, работающих по иным циклам, чем цикл Карно, вследствие необратимости процессов в различных элементах установки имеют значительно меньшую величину и лежат в пределах 4–6,5.

### Схема установки

Лабораторная установка представляет собой сплит-систему, схема которой изображена на рис. 9.3.

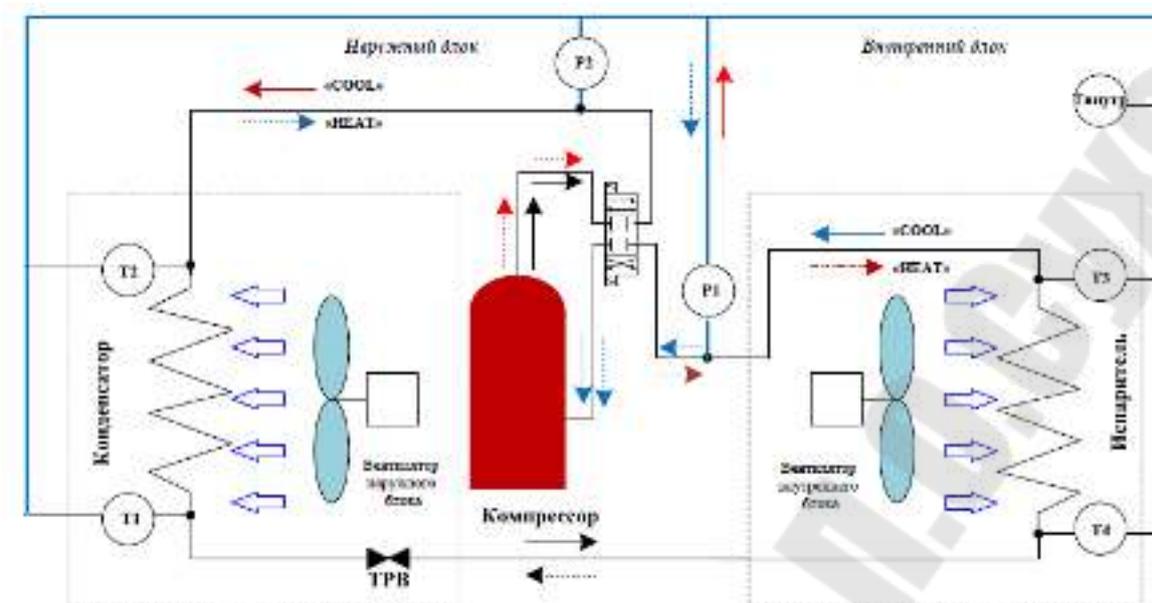


Рис. 9.3. Схема лабораторной установки

### Порядок выполнения работы

1. Установить режим работы сплит-системы «HEAT» и задать температуру  $T_{\text{внутр}}$  на  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  выше температуры  $T_{\text{нар}}$  с помощью пульта.
2. Включить стенд автоматическими выключателями QF1. Записать начальные показания расхода электроэнергии на счетчике SW1.
3. Установить тумблер SA1 в положение « $T_{\text{внутр}}$ ; Влажность» и снять показания  $T_{\text{нар}}$ ,  $T_{\text{внутр}}$  и влажности в исследуемом боксе на силовом агрегате.
4. Включить кондиционер и задать с помощью его пульта управления температуру на  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ниже температуры  $T_{\text{нар}}$ . Записать время начала эксперимента. При нахождении тумблера SA1 в положении « $T_{\text{внутр}}$ ; Влажность» следить за показаниями температуры  $T_{\text{внутр}}$  и влажности внутри бокса силового агрегата.
5. При выходе установки на рабочий режим (температура  $T_3$  достигает максимального установившегося значения) с помощью анемометра произвести измерение температуры воздуха на выходе вентилятора наружного блока и расход воздуха через конденсатор.
6. По достижении  $T_{\text{внутр}}$  равной заданной на пульте управления снять показания термометров  $T_1$ – $T_4$  при работающем компрессоре кондиционера.

7. Установить тумблер SA1 в положение «P1, P2» и снять показания величины давлений фреона на входе и выходе компрессора.

8. Отключить кондиционер с помощью пульта управления и снять показания счетчика SW<sub>1</sub> и зафиксировать время окончания эксперимента.

9. Все данные занести в таблицу.

$T_{\text{внутр}},$ °C	$T_{\text{нар}},$ °C	$T_1,$ °C	$T_2,$ °C	$T_3,$ °C	$T_4,$ °C	$P_1,$ МПа	$P_2,$ МПа	$N_k,$ кВт	$\omega,$ м/с

10. На основе полученных данных рассчитать тепловую нагрузку конденсатора, расход холодильного агента. Далее вычислить теплопроизводительность системы и удельную теплопроизводительность и эффективность сплит-системы в качестве теплового насоса при температуре  $T_{\text{нар}}$ .

### Обработка полученных результатов

1. По параметрам хладагента (R404a) строим цикл теплового насоса в  $\lg p-h$  координатах.

2. По  $\lg p-h$  диаграмме определяем энтальпии характерных точек:  $h_1, h_2, h_3 = h_4$ .

3. Определяем удельные характеристики цикла:

а) работа компрессора, кДж/кг:

$$l_k = h_2 - h_1; \quad (9.2)$$

б) теплота, полученная в конденсаторе, кДж/кг:

$$q_k = h_2 - h_3; \quad (9.3)$$

в) теплота, подводимая от охлаждаемого объекта в испарителе, кДж/кг:

$$q_0 = h_1 - h_3; \quad (9.4)$$

г) теоретический коэффициент преобразования теплоты:

$$\mu = \frac{q_k}{l_k}. \quad (9.5)$$

4. Тепловая мощность конденсатора, кВт:

$$Q_k = c_B G_B (t''_k - t'_k), \quad (9.6)$$

где  $c_B$  – теплоемкость воздуха, кДж/кг;  $G_B$  – массовый расход воздуха через конденсатор, кг/с.

$$G_B = V_B \rho = \omega S \rho, \quad (9.7)$$

где  $V_B$  – объемный расход воздуха через конденсатор, м<sup>3</sup>/с;  $S$  – площадь сечения конденсатора, м<sup>2</sup>.

5. Действительный коэффициент преобразования теплоты:

$$\mu = \frac{Q_k}{N_k}. \quad (9.8)$$

6. Сравнить теоретический и действительный коэффициенты преобразования теплоты, сделать выводы об эффективности применения данного теплового насоса.

### Контрольные вопросы

1. Определение теплового насоса.
2. Классификация тепловых насосов.
3. Конструкция парокомпрессионного теплового насоса.
4. Построение циклов тепловых насосов в  $T-s$  диаграмме.
5. Построение циклов тепловых насосов в  $p-h$  диаграмме.
6. Области применения тепловых насосов.
7. Источники низкопотенциальной теплоты для тепловых насосов.

## Литература

1. Вукалович, М. П. Термодинамика : учеб. пособие для вузов / М. П. Вукалович, И. И. Новиков. – М. : Машиностроение, 1972. – 670 с.
2. Кудинов, В. А. Техническая термодинамика : учеб. пособие для вузов / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов. – М. : Высш. шк., 2003. – 261 с.
3. Хрусталеv, Б. М. Техническая термодинамика : учеб. для строит. и энергет. специальностей вузов : в 2 ч. / Б. М. Хрусталеv, А. П. Несенчук, В. Н. Романюк. – Минск : Технопринт, 2004. – Ч. 1 / Б. М. Хрусталеv. – 2004 . – 486 с.
4. Хрусталеv, Б. М. Техническая термодинамика : учеб. для строит. и энергет. специальностей вузов : в 2 ч. / Б. М. Хрусталеv, А. П. Несенчук, В. Н. Романюк. – Минск : Технопринт, 2004. – Ч. 2 / Б. М. Хрусталеv. – 2005. – 560 с.
5. Сборник задач по технической термодинамике / Т. Н. Андрианова [и др.]. – 3-е изд. – М. : Энергоиздат, 1981. – 240 с.
6. Андрианова, Т. Н. Сборник задач по технической термодинамике : учеб. пособие для вузов / Т. Н. Андрианова. – М. : МЭИ, 2006. – 354 с.

## Содержание

<i>Лабораторная работа № 1. Методы измерения давления и температуры</i> .....	3
<i>Лабораторная работа № 2. Определение изобарной теплоемкости газов</i> .....	6
<i>Лабораторная работа № 3 (4 части). Исследование процессов идеальных газов</i> .....	13
<i>Лабораторная работа № 4. Исследование кривой упругости водяного пара</i> .....	26
<i>Лабораторная работа № 5. Исследование процесса истечения воздуха через суживающееся сопло</i> .....	33
<i>Лабораторная работа № 6. Исследование работы одноступенчатого компрессора</i> .....	41
<i>Лабораторная работа № 7. Исследование работы двигателя внутреннего сгорания</i> .....	51
<i>Лабораторная работа № 8. Исследование цикла холодильной машины</i> .....	57
<i>Лабораторная работа № 9. Определение основных характеристик теплового насоса</i> .....	62
<i>Литература</i> .....	68

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

**Овсянник Анатолий Васильевич**  
**Новиков Михаил Николаевич**  
**Трошев Дмитрий Сергеевич**

## **ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА**

### **Практикум**

**по одноименному курсу для студентов специальностей**  
**1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика»**  
**и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация**  
**энергооборудования организаций»**  
**дневной и заочной форм обучения**

**Электронный аналог печатного издания**

Редактор *А. В. Власов*  
Компьютерная верстка *Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 25.11.16.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Цифровая печать. Усл. печ. л. 3,95. Уч.-изд. л. 4,20.

Изд. № 77.

<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение  
Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого.  
Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя  
печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.  
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48