



М. А. БЕСПЯТОВ, К. Ф. НЕЧИТАЙЛО,  
В. Г. СЕЛИВАНОВ,  
В. Л. СИМБИРСКИЙ, С. Д. ФРОЛОВ

**ТЕХНИЧЕСКАЯ  
ТЕРМОДИНАМИКА**

1990



УДК 536.71 (075.8)

Техническая термодинамика: Учеб. пособие /М.А. Беспятов, К.Ф. Нечитайло, В.Г. Селиванов, В.Л. Симбирский, С.Д. Фролов. - Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1990. - 82 с.

Дано описание лабораторных работ по дисциплине "Термодинамика". Работы сгруппированы по четырем темам (уравнения состояния газов, первое начало термодинамики, политропные процессы, исследование рабочих процессов в элементах энергоустановок).

По каждой теме приведены краткие теоретические сведения, необходимые для подготовки к лабораторным работам.

Описание работ включает в себя постановку задач исследования, схемы экспериментальных установок, методику проведения опытов и обработки результатов измерений.

Пособие ориентировано на развитие у студентов навыков использования термодинамического метода при исследовании физических процессов в элементах авиационной техники.

Для студентов авиационных вузов.

Ил.19.

Библиогр.: 9 назв.

Рецензенты: канд. техн. наук, доц. А.А. Левченко  
канд. техн. наук, доц. И.В. Сайчук

Под редакцией В. Г. Селиванова

## І . В В Е Д Е Н И Е

При термодинамическом исследовании конкретных термодинамических систем необходимо задавать их макроскопические свойства в форме термических уравнений состояния, и поэтому первая тема "Термические уравнения состояния газов" предполагает ознакомление с этими уравнениями, лабораторные исследования справедливости приложения некоторых уравнений состояния к реальному газу, а также получение термического уравнения состояния продуктов сгорания на основе экспериментального исследования их состава и теории смесей идеальных газов.

В лабораторных работах по теме "Первое начало термодинамики" в качестве объектов исследования выбраны открытые термодинамические системы, которые наиболее характерны для технических приложений в области авиационной техники. При выполнении этих работ особое внимание следует уделять выбору контрольной поверхности, определяющей границы подлежащей исследованию системы, и конкретизации аналитического выражения первого начала термодинамики применительно к поставленным в работах задачам, с также формулировке допущений, т.е. тем вопросам, которые определяют постановку задачи исследования.

Тема "Полиτροпные процессы" призвана развить у студентов навыки экспериментального определения показателя политропы, позволяющего связать параметры газа в конкретных процессах, установить их энергетические характеристики. При выполнении этих работ необходимо акцентировать внимание на обобщающем значении политропного процесса, качественном анализе энергетических эффектов, реализуемых в том или ином процессе.

В заключительном разделе "Исследование эффективности рабочего процесса в элементах энергоустановок" приведены описания работ, связанных с исследованием процессов в камере сгорания, турбине и компрессоре, т.е. в устройствах, являющихся одними из основных узлов авиационного двигателя. Процессы в соплах и диффузорах достаточно подробно рассматриваются в курсе "Прикладная гидродинамика", который изучается непосредственно после курса "Термодинамика". Поэтому эти элементы не включены в список подлежащих исследованию объектов.

В некоторых работах, связанных, в частности, с исследова-

нием процессов в турбине и компрессоре, поставлены лишь задачи исследования, приведено описание экспериментальной установки и порядок работы на ней. Студентам предоставляется возможность самостоятельно выбрать необходимые для решения поставленных задач измеряемые параметры, методику обработки результатов измерений и форму представления итогов исследования. Это расширяет возможности творческого подхода к выполнению работ и на завершающей стадии изучения курса не должно представлять трудностей для студентов.

Отчет о выполненной лабораторной работе должен содержать:

- а) постановку задачи исследования;
- б) схему экспериментальной установки с указанием основных ее элементов;
- в) результаты измерений величин, необходимых для решения поставленной задачи;
- г) обработку результатов измерений с описанием используемых расчетных соотношений;
- д) выводы.

## 2. ТЕРМИЧЕСКИЕ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ГАЗОВ

### 2.1. Общие положения

Термодинамический метод исследования физических процессов основан на использовании исходных постулатов, основных законов (начал) термодинамики и данных о физических свойствах конкретных изучаемых объектов. Эти данные представляются в форме термического и калорического уравнений состояния равновесных термодинамических систем.

Термическое уравнение состояния простых систем, к которым в большинстве случаев относятся рабочие тела тепловых машин (газ, жидкость и ее пар), отражает связь между термическими параметрами состояния, а именно: давлением, удельным объемом (или плотностью) и температурой.

Калорическое уравнение состояния представляет собой связь между внутренней энергией системы или связанных с ней функций состояния (энтальпией, энтальпией либо изобарной теплоемкостью и др.) и термическими параметрами состояния.

Термическое уравнение состояния простой термодинамической системы имеет следующий общий вид:

$$f(P, v, T) = 0. \quad (2.1)$$

### 2.1.1. Термическое уравнение состояния идеального газа

Для газа при малых его плотностях справедливо термическое уравнение состояния, представленное в одной из следующих форм:

$$Pv = RT; \quad (2.2)$$

$$P = \rho RT; \quad (2.3)$$

$$Pv_{\mu} = R_{\mu}T; \quad (2.4)$$

$$PV = MRT; \quad (2.5)$$

$$PV = NR_{\mu}T. \quad (2.6)$$

Здесь  $P$ ,  $T$  - абсолютные давление,  $\text{Н/м}^2$ , и температура,  $\text{К}$ ;

$V$ ,  $M$  - объем,  $\text{м}^3$ , и масса,  $\text{кг}$ , газа;

$v = V/M$  - удельный объем,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ;

$\rho = 1/v$  - плотность газа,  $\text{кг/м}^3$ ;

$N = M/\mu$  - число киломолей газа ( $\mu$  - молекулярная масса,  $\text{кг/моль}$ );

$v_{\mu} = V/N$  - мольный объем,  $\text{м}^3/\text{кмоль}$ ;

$R$  - газовая постоянная данного газа,  $\text{Дж}/(\text{кг К})$ ,

$$R = R_{\mu}/\mu; \quad (2.7)$$

$R_{\mu} = 3314 \text{ Дж}/(\text{кмоль К})$  - универсальная газовая постоянная.

Газ, подчиняющийся уравнениям (2.2) - (2.6), называют **идеальным газом**. В идеальном газе объем молекул пренебрежимо мал по сравнению с занимаемым газом объемом, а также пренебрежимо малы силы взаимодействия между молекулами на среднестатистических расстояниях между ними.

Уравнения (2.2) - (2.6) называют термическими уравнениями состояния идеального газа.

Для многокомпонентного идеального газа (например, для воздуха, продуктов сгорания различных топлив в воздухе и т.д.)

термическое уравнение состояния идеального газа справедливо как для смеси  $n$  компонентов в целом, так и для каждого компонента:

$$PV = MR_{см}T, \quad (2.8a)$$

$$Pv_{см} = R_{см}T; \quad (2.8b)$$

$$P_i V = M_i R_i T; \quad (2.9)$$

$$P V_i = M_i R_i T; \quad (2.10)$$

$$P V_i = N_i R_i T. \quad (2.11)$$

При этом

$$P = \sum_{i=1}^n P_i \quad (\text{закон Дальтона}), \quad (2.12)$$

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (\text{закон Амага}), \quad (2.13)$$

$$R_{см} = R_{\mu} / \mu_{см}, \quad (2.14)$$

$$\mu_{см} = M / N, \quad (2.15)$$

$$M = \sum_{i=1}^n M_i, \quad (2.16)$$

$$N = \sum_{i=1}^n N_i, \quad (2.17)$$

где

$R_{см}$  — газовая постоянная смеси;

$P_i$  — парциальное давление данного компонента;

$V_i$  — парциальный объем компонента;

$M_i, N_i = M_i / \mu_i, R_i$  — масса, количество киломолей и газовая постоянная компонента;

$\mu_{см}$  — кажущаяся (условная) молекулярная масса смеси;

$T$  — температура смеси, являющаяся также температурой каждого компонента.

Для использования уравнений (2.8a) и (2.8b) необходимо выразить газовую постоянную смеси через свойства составляющих смесь компонентов и ее состав.

Если состав смеси задан массовыми долями  $g_i = M_i / M$ , из приведенных выше соотношений следует выражение для определения газовой постоянной смеси:

$$R_{см} = \sum_{i=1}^n (m_i R_i). \quad (2.18)$$

При задании состава смеси объемными долями  $\zeta_i = V_i/V$  при определении  $R_{см}$  удобно вначале найти кажущуюся молекулярную массу смеси

$$\mu_{см} = \sum_{i=1}^n (\zeta_i \mu_i), \quad (2.19)$$

а затем вычислить газовую постоянную смеси по соотношению (2.14).

### 2.1.2. Термические уравнения состояния реальных газов

По мере увеличения плотности газа (при увеличении давления или уменьшении температуры) взаимосвязь термических параметров состояния все менее строго описывается зависимостями (2.2) - (2.6), т.е. теоретическая модель идеального газа становится неприемлемой.

Как видно из (2.2), изотермы идеального газа на диаграмме состояния  $P$ - $V$  представляют собой гиперболы. Изотермы реального газа при больших плотностях газа существенно отличаются от гипербол, особенно в области параметров, при которых возможны конденсация газа и равновесное сосуществование газообразной и жидкой фаз вещества. При параметрах, соответствующих двухфазному состоянию или близких к нему, газ называется паром.

На рис. 2.1 показан типичный вид изотермы в области состояний, охватывающих как парообразную, так и жидкую фазу вещества.

Изотермическое сжатие газа при температуре, меньшей некоторого критического значения ( $T < T_{кр}$ ), только при больших значениях удельного объема осуществляется по изотерме идеального газа. С повышением давления и уменьшением удельного объема изотерма все больше отклоняется от гиперболы, а в точке 2, лежащей на линии  $Kg$ , называемой верхней пограничной кривой, в газе (паре) появляется жидкость, и дальнейшее сжатие осуществляется без повышения давления до полного превращения пара в жидкость (точка 3 на линии  $Kf$ , называемой нижней пограничной кривой). Дальнейшее уменьшение объема жидкости приводит к резкому повышению давления в силу малой сжимаемости жидкости.

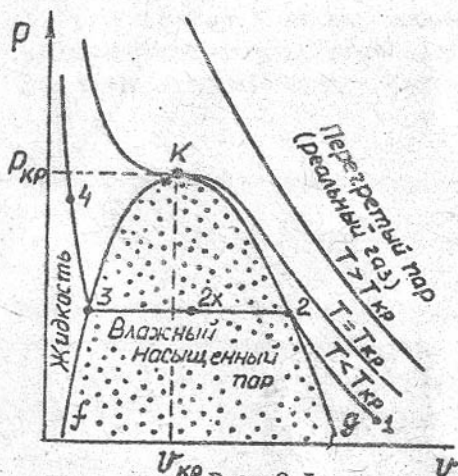


Рис. 2.1

рис. 2.1. Изотерма, проходящая через критическую точку, имеет в ней перегиб с горизонтальной касательной. Изотермы, соответствующие температурам  $T > T_{кр}$ , также существенно отклоняются от гипербол и только при значительном увеличении температуры приближаются к ним.

Состояния с параметрами на линии  $Kf$  соответствуют жидкости, догретой до температуры кипения. Пар с параметрами на линии  $Kg$  называют сухим насыщенным паром. Смесь сухого насыщенного пара и жидкости, догретой до температуры кипения, представляет собой влажный насыщенный пар. Его возможные состояния находятся в области между линиями  $Kf$  и  $Kg$ . Пар с параметрами в области правее и выше линии  $Kg$  называют перегретым паром или реальным газом. Область левее линии  $Kf$  соответствует жидкому состоянию вещества.

Одним из простейших уравнений, качественно верно описывающих свойства вещества в области реального газа и жидкости, является уравнение Ван-дер-Ваальса:

$$(p + a/v^2)(v - b) = RT \quad (2.20)$$

где  $a$  и  $b$  - постоянные для данного газа величины. В уравнении (2.20) приближенно учтено влияние сил взаимодействия между

С увеличением температуры изотермического сжатия область двухфазного состояния на изотерме уменьшается и при некотором критическом значении ( $T = T_{кр}$ ) сжатие пара осуществляется без фазового перехода. Параметры, при которых теряется качественное различие между паром и жидкостью, выражающееся в наличии поверхности раздела между ними, называются критическими ( $T_{кр}$ ;  $P_{кр}$ ;  $v_{кр}$ ). Этим параметрам соответствует точка  $K$  на



молекулами на среднестатистических расстояниях между ними, а также конечность объема, занимаемого в газе молекулами.

Константы уравнения (2.20) можно выразить через критические параметры вещества, используя условие перегиба изотермы в критической точке, а именно:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_{T_{кр}} = 0, \quad \left(\frac{\partial^2 p}{\partial v^2}\right)_{T_{кр}} = 0. \quad (2.21)$$

Из (2.21) с учетом (2.20) получим:

$$\alpha = \frac{27}{64} \frac{R^2 T_{кр}^2}{P_{кр}}; \quad \beta = \frac{1}{8} \frac{RT_{кр}}{P_{кр}}. \quad (2.22)$$

В силу того, что критические параметры вещества могут быть определены экспериментально достаточно точно (в частности, по исчезновению мениска, разделяющего жидкость и пар, в критической точке), соотношения (2.22) имеют важное практическое значение.

Уравнение Ван-дер-Ваальса является весьма приближенным и не обеспечивает требуемой точности технических расчетов. В связи с этим в настоящее время предложено множество более точных, хотя и более сложных многоконстантных уравнений. Из них теоретически обосновано уравнение Н.Н. Боголюбова и Р. Майера в вириальной форме:

$$p v = RT \left( 1 + \frac{B(T)}{v} + \frac{C(T)}{v^2} + \frac{D(T)}{v^3} + \dots \right), \quad (2.23)$$

где  $B$ ,  $C$ ,  $D$ , ... - второй, третий, четвертый и т.д. вириальные коэффициенты, зависящие для данного газа только от температуры.

Рассмотрим один из путей экспериментального определения вириальных коэффициентов. Пусть для определенного значения температуры  $T$  имеется ряд экспериментальных данных  $p$  и  $v$ . Представим эти данные в виде зависимости  $z = \frac{p v}{RT}$  от  $p$  (рис. 2.2). Из (2.23) следует, что

$$dz = d\left(\frac{p v}{RT}\right) = d(1 + B p + C p^2 + \dots) = B dp + 2C p dp + \dots, \\ \text{или} \quad B = \frac{dz}{dp} \quad \text{при} \quad p \rightarrow 0. \quad (2.24)$$

Экспериментальные точки при  $p \rightarrow 0$  получить практически невозможно, но очевидно, что при  $p \rightarrow 0$  газ уподобляется идеальному

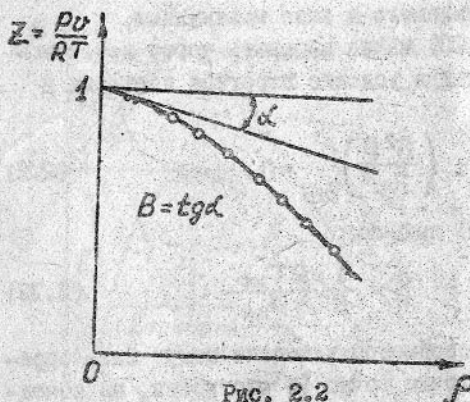


Рис. 2.2

газу, т.е.  $Z = 1$ . На основании этого полученную зависимость  $Z = Z(p)$  можно экстраполировать в точку  $p = 0$ ,  $Z = 1$  и, построив в этой точке касательную к полученной кривой, найти второй вириальный коэффициент  $B$ :

$$B = \operatorname{tg} \alpha,$$

где  $\alpha$  - угол наклона касательной.

Аналогичным способом можно затем определить третий и т.д. вириальные коэффициенты

при той же температуре, например, построив зависимость величины

$$\frac{Z-1}{p} = B + Cp + Dp^2 + \dots$$

от  $p$  и, экстраполировав ее в точку  $\frac{Z-1}{p} = B$  при  $p \rightarrow 0$ , найти

$$C = \left( \frac{d \left( \frac{Z-1}{p} \right)}{dp} \right)_{p \rightarrow 0}.$$

Для определения зависимостей вириальных коэффициентов от температуры необходимо использовать экспериментальные данные о зависимости давления от удельного объема при других температурах.

При описании температурной зависимости второго вириального коэффициента применяется выражение

$$B = B_0 + \frac{B_1}{T} + \frac{B_2}{T^2} + \dots \approx B_0 + \frac{B_1}{T}. \quad (2.25)$$

Для нахождения постоянных  $B_0$  и  $B_1$  в уравнении (2.25) достаточно располагать значениями  $B$  для двух температур.

Установлено, что для реальных газов приближенно справедлива общая зависимость

$$pv = zRT, \quad (2.26)$$

здесь

$$z = z \left( \frac{p}{p_{кр}}, \frac{T}{T_{кр}} \right), \quad (2.27)$$

где  $p_{кр}$ ,  $T_{кр}$  - критические параметры.

Аналитическое выражение зависимости (2.27) являлось бы обобщенным уравнением состояния в безразмерном виде. На рис. 2.3 зависимость (2.27) приведена в виде номограммы, описывающей

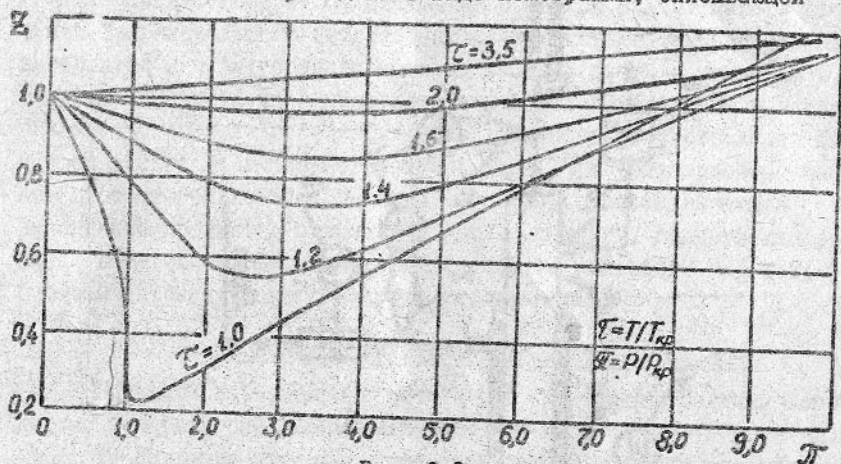


Рис. 2.3

состояние целой группы газов, термодинамически подобных между собой. Для приложения уравнения (2.26) к конкретному реальному газу необходимо знать лишь значения его критических параметров  $P_{кр}$ ,  $T_{кр}$  для определения  $Z$  по приведенной диаграмме.

## 2.2. Лабораторная работа №1. АНАЛИЗ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ КАК СМЕСИ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

### 2.2.1. Задание

1. Экспериментальным путем определить состав продуктов сгорания.
2. Рассчитать газовую постоянную продуктов сгорания, предполагая их смесью идеальных газов.
3. Определить удельный объем и плотность продуктов сгорания.
4. Вычислить массовые доли компонентов в смеси и их парциальные давления.

### 2.2.2. Описание экспериментальной установки

Эксперименты выполняются на установке, схема которой приведена на рис. 2.4. Установка предназначена как для выполнения

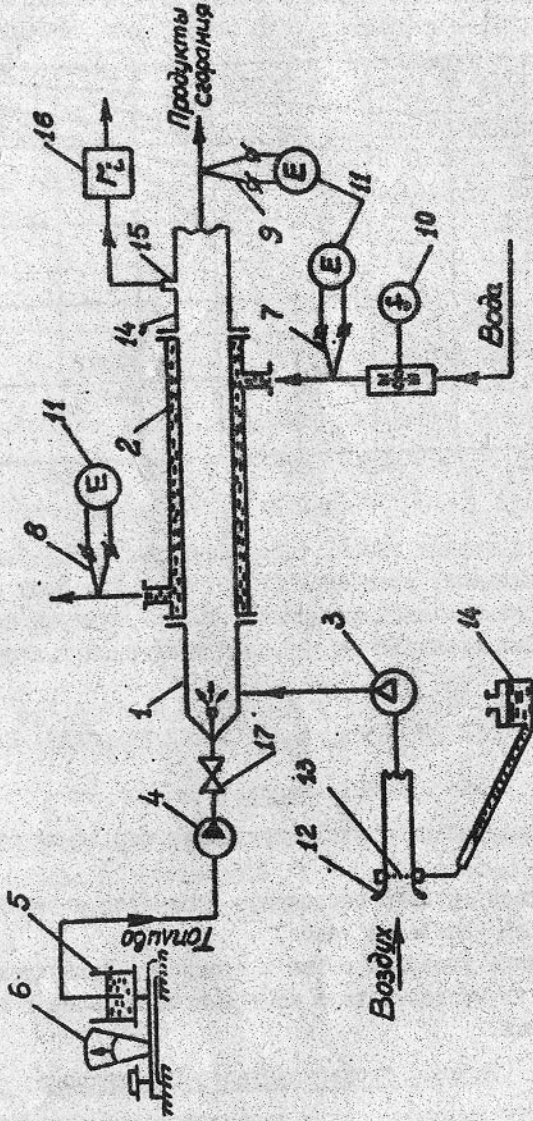


Рис. 2.4

данной лабораторной работы, так и для работы № 9, описанной в подразд. 5.1.

Установка состоит из следующих основных узлов: камеры сгорания 1; газовой теплообменника 2; системы топливоподачи, включающей в себя установленный на весах 6 бачок с топливом 5, топливный насос 4 и электрогидроклапан 17; системы подачи воздуха в камеру сгорания, состоящей из воздухозаборного устройства 12 и компрессора 3; выхлопного коллектора 14 с установленным на нем пробоотборником 15; водяной магистрали, обеспечивающей охлаждение продуктов сгорания в теплообменнике; средств измерений, необходимых для выполнения лабораторных работ № 1 и 9; системы автоматического запуска установки.

### 2.2.3. Измеряемые величины и средства измерений

В данной лабораторной работе для выполнения задания необходимо измерить следующие величины:

1. Давление и температуру атмосферы. Измеряются с помощью барометра и термометра, находящихся в лаборатории.

2. Температуру продуктов сгорания. Измеряется с помощью хромель-копелевой термопары 9, расположенной в выхлопной трубе 14 и подключенной к цифровому милливольтметру 11 через переключатель термопар, который нужно установить в положение, обеспечивающее подключение именно этой термопары. Холодный спай термопары находится при температуре атмосферы.

3. Объемные доли компонентов в продуктах сгорания. Измеряются с помощью химического газоанализатора (прибор ОРСА) 16, устройство и принцип действия которого рассмотрим более подробно.

Схема прибора представлена на рис. 2.5. Принцип действия прибора основан на последовательном поглощении отдельных компонентов газовой смеси специальными растворами - поглотителями.

В продуктах сгорания углеводородных топлив в общем случае могут содержаться кислород ( $O_2$ ), диоксид углерода ( $CO_2$ ), оксид углерода ( $CO$ ) и пары воды ( $H_2O$ ). Водород при избытке воздуха для горения, что характерно для авиационных двигателей, сгорает полностью и в свободном состоянии в продуктах сгорания обычно отсутствует.

Пар воды конденсируется в холодных трубках системы подвода

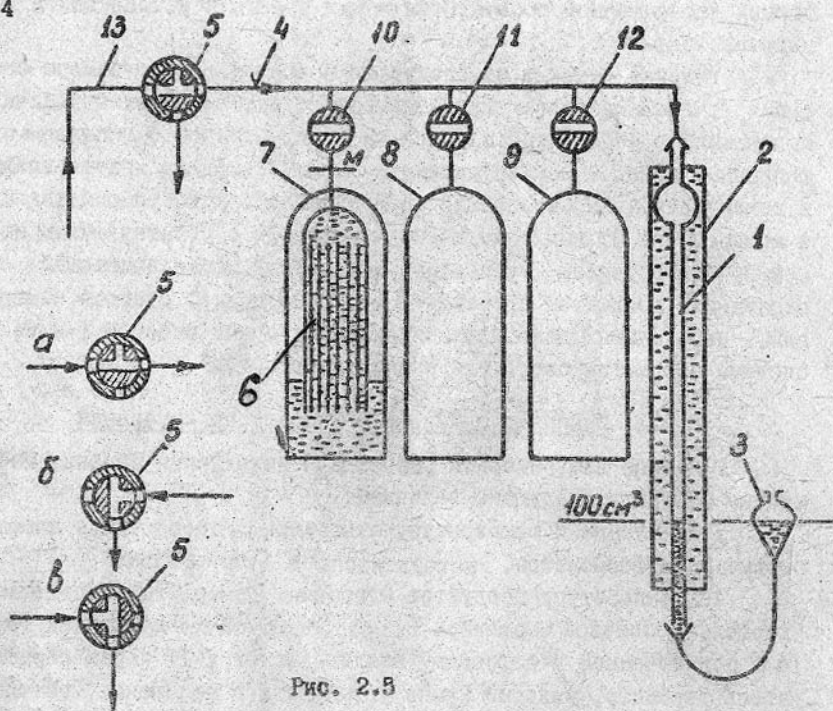


Рис. 2.5

пробы к газоанализатору и не попадает в него, что необходимо учесть при обработке результатов измерения. Таким образом, в приборе используются растворы для поглощения  $\text{CO}_2$  (водный раствор КОН),  $\text{O}_2$  (водный раствор КОН и пирогалла),  $\text{CO}$  (водный раствор хлористого аммония и полухлористой меди с добавлением раствора аммиака). Следует иметь в виду, что поглотитель  $\text{O}_2$  поглощает также  $\text{CO}_2$ , а поглотитель  $\text{CO}$  поглощает и  $\text{O}_2$ , и  $\text{CO}_2$ . Поэтому при проведении анализа проб газа необходимо поглотить вначале  $\text{CO}_2$ , а затем  $\text{O}_2$  и  $\text{CO}$ .

Подготовка прибора к работе и выполнение газового анализа осуществляется в такой последовательности. Кран 5 ставят в положение "б", соединяя прибор с атмосферой, и, медленно поднимая склянку 3, заполняют бюретку I до верха. Затем кран 5 переводят в положение "в", открывают кран 10 (кран 11 и 12 закрыты) и медленно опускают склянку 3. Таким образом заполняют сосуд 6

раствором, перетекающим в него из сосуда 7. Уровень раствора доводят до метки М на трубе сосуда 6 и закрывают кран 10.

Так же подготавливают к работе остальные сосуды 8 и 9. После подготовки прибора приступают к забору пробы газа. Для этого приемную трубку 13 крана 5 соединяют с газозаборником, расположенным в выхлопной трубе камеры сгорания. Кран 5 устанавливают в положение "б", а уравнительную склянку 3 поднимают до полного заполнения бюретки запорной жидкостью. Затем кран 5 переводят в положение "а" и, опуская уравнительную склянку, засасывают газ в бюретку. Так как перед заполнением прибора газом в трубках находился воздух, который смешался с газом, то этот газ не пригоден для анализа. Поэтому его нужно выдуть в атмосферу, переводя кран 5 в положение "б" и подняв уравнительную склянку до заполнения бюретки запорной жидкостью. Затем кран 5 снова переводят в положение "а" и повторяют наполнение прибора газом. Эту операцию повторяют 3...4 раза. После такой "промывки" прибора приступают к забору пробы для анализа.

Установив, как и в предыдущих случаях, уровень жидкости в бюретке в крайнее верхнее положение, кран 5 переводят в положение "а" и, опуская склянку 3, наполняют бюретку газом, опуская уровень жидкости ниже отметки 100 см<sup>3</sup>. Затем кран 5 переводят в положение "б" и, очень медленно поднимая склянку 3, доводят уровень жидкости до метки 100, после чего, зафиксировав в таком положении уравнительную склянку, кран 5 переводят в положение "в". Отобранный для пробы газ оказывается, таким образом, изолированным в приборе, что дает возможность выполнять газовый анализ.

Как было уже отмечено, составные компоненты газовой пробы поглощаются в такой последовательности:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ . Оставшийся после поглощения этих составляющих объем газа содержит преимущественно  $\text{N}_2$  и менее 1% примесей.

Для поглощения  $\text{CO}_2$  открывают кран 10 и, поднимая уравнительную склянку 3, переводят газ в поглотительный сосуд 6, а затем опускают склянку 3, возвращая газ в бюретку. Эту операцию повторяют 6...8 раз. При переводе газа в бюретку последний раз уровень жидкости в сосуде 6 доводят (очень медленно) до метки М и закрывают кран 10.

После этого подносят склянку 3 к бюретке и, медленно перемещая склянку, устанавливая уровень жидкости в ней и бюретке на одной высоте, регистрируют положение уровня. Разность объема исходной пробы и объема, оставшегося после поглощения газа, дает парциальный объем диоксида углерода  $\Delta V_{CO_2}$  в продуктах сгорания.

Повторяя те же приемы последовательно для остальных сосудов, определяют парциальные объемы  $O_2$  и  $CO$ .

Обратите внимание на то, что прокачивание газа в поглотительные сосуды следует производить медленно, не допуская попадания поглотительной жидкости в краны или запорной жидкости в распределительную трубу 4.

#### 2.2.4. Порядок проведения эксперимента

1. Включить цифровой милливольтметр.
2. Переключатель термомпар установить в положение, соответствующее измерению температуры продуктов сгорания. Это положение указано на пульте.
3. Открыть кран подачи воды в газовойодяной теплообменник 2 (кран обозначен на пульте).
4. Включить тумблеры запуска установки (указаны на пульте), после чего запуск камеры сгорания произойдет автоматически, причем выход параметров установки на стационарный режим ее работы произойдет через 5...6 минут. Характерным признаком этого режима является постоянство температуры продуктов сгорания (показаний милливольтметра).
5. После выхода установки на стационарный режим работы выполнить измерения:
  - температуры  $t_0$  ( $^{\circ}C$ ) и давления  $P_0$ , КПа, окружающей среды;
  - электродвижущей силы термомпары  $E_{TP}$ , мВ.
6. Произвести забор пробы газа в газоанализатор в описанной выше последовательности.
7. Выключить установку и приступить к определению парциальных объемов компонентов с помощью химического газоанализатора.



### 2.2.5. Методика обработки результатов эксперимента

Для определения состава продуктов сгорания обратимся к результатам газового анализа, которые для наглядности представим схематически (рис. 2.6). Из этой схемы следует, что для определения объемных долей компонентов необходимо найти полный объем

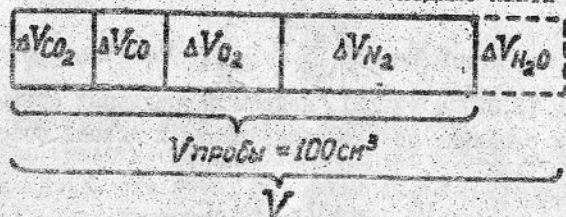


Рис. 2.6

пробы  $V$ , который превышает наблюдаемый объем в биретке  $V_n = 100 \text{ см}^3$  на величину парциального объема пара воды  $\Delta V_{H_2O}$ .

Для нахождения  $\Delta V_{H_2O}$  воспользуемся тем фактом, что соотношение массы углерода и водорода в пробе до конденсации пара  $H_2O$  было таким же, как и в исходном топливе, условная формула которого известна:  $C_{12}H_{24}$ . Это позволяет вычислить массу водорода в сконденсированном объеме  $\Delta V_{H_2O}$ :

$$M_H = M_C \frac{\mu_H \cdot 24}{\mu_C \cdot 12} = 2M_C \mu_H / \mu_C. \quad (2.28)$$

Масса углерода, который содержится в  $CO_2$  и  $CO$ , определяется по аналогичным соотношениям. Тогда

$$M_C = M_{CO_2} \frac{\mu_C}{\mu_{CO_2}} + M_{CO} \frac{\mu_C}{\mu_{CO}}. \quad (2.29)$$

В свою очередь, массы  $M_{CO_2}$  и  $M_{CO}$  можно найти из термического уравнения состояния, записанного для одного компонента:

$$P \Delta V_{CO_2} = M_{CO_2} R_{\mu} T / \mu_{CO_2}, \quad P \Delta V_{CO} = M_{CO} R_{\mu} T / \mu_{CO} \quad (2.30)$$

или

$$M_{CO_2} = \frac{\mu_{CO_2} P \Delta V_{CO_2}}{R_{\mu} T}, \quad M_{CO} = \frac{\mu_{CO} P \Delta V_{CO}}{R_{\mu} T}. \quad (2.31)$$

Подставляя последовательно (2.31) в (2.29), а (2.29) в (2.28), получим

$$M_H = \frac{2P}{R_{\mu}T} \mu_H (\Delta V_{CO_2} + \Delta V_{CO}). \quad (2.32)$$

С другой стороны, эта же масса водорода содержалась в паре воды. Тогда

$$M_H = M_{H_2O} \frac{\mu_H}{\mu_{H_2O}} = \frac{2P}{R_{\mu}T} \mu_H \Delta V_{H_2O}. \quad (2.33)$$

Сопоставляя (2.32) и (2.33), найдем парциальный объем пара воды в продуктах сгорания до его конденсации и полный объем газовой пробы:

$$\Delta V_{H_2O} = \Delta V_{CO_2} + \Delta V_{CO}, \quad (2.34)$$

$$V = V_n + \Delta V_{H_2O}. \quad (2.35)$$

Теперь можно определить объемные доли каждого компонента:

$$z_i = \frac{\Delta V_i}{V}; \quad z_{H_2} = 1 - z_{CO_2} - z_{CO} - z_{O_2} - z_{H_2O}. \quad (2.36)$$

Вычисление кажущейся молекулярной массы, газовой постоянной смеси, парциальных давлений и массовых долей компонентов, а также удельного объема и плотности смеси осуществляется по приведенным в подразд. 2.2 зависимостям после предварительного определения температуры продуктов сгорания по показаниям термомпары. При этом давление газа в выпускной трубе с достаточной точностью можно считать равным атмосферному.

Для определения температуры необходимо привести показания милливольтметра к условиям стандартной градуировочной таблицы термомпары (см. прил. I), в которой холодный спай термомпары предполагается находящимся при температуре 0°C. В нашем эксперименте он находится при температуре окружающей среды. Поэтому при пользовании таблицей следует предварительно ввести поправку, учитывающую значение электродвижущей силы  $E_0$ , развиваемой термомпарой в интервале температур 0°C и  $t_0$ :

$$E_{\text{табл}} = E_{\text{тп}} + E_0, \quad (2.37)$$

где поправка  $E_0$  находится по той же градуировочной таблице, а

по найденному значению  $E_{\text{табл}}$  определяется искомая температура продуктов сгорания.

### 2.3. Лабораторная работа № 2

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО СЖАТИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

##### 2.3.1. Задание

1. Получить экспериментальные зависимости давления от удельного объема при изотермическом сжатии углекислого газа для значений температур ниже и выше критической.

2. Сопоставить опытные данные с расчетами по уравнению состояния идеального газа, уравнению Ван-дер-Ваальса и на основе использования диаграммы зависимости коэффициента сжимаемости от приведенных температуры и давления. Оценить точность описания реальных свойств углекислого газа описанными способами.

##### 2.3.2. Описание экспериментальной установки

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.7.

Исследуемый газ находится в толстостенном стеклянном капилляре I, который соединен с колбой IO. Через отверстие "а" в колбу поступает залитая в стальной сосуд 2 ртуть. Пространство над ртутью заполнено маслом. Давление масла, передаваемое на ртуть, которая сжимает газ в капилляре, изменяется с помощью поршневого насоса 3 или стравливающего вентиля 4 и измеряется образцовым манометром 5. Величина предельного давления, допускаемая при работе на установке, равна 70 ... 80 бар.

Для обеспечения изотермичности исследуемого газа капилляр, в котором он находится, помещен в резервуар 6 с проточной жидкостью, подаваемой из термостата 7. Термостат обеспечивает циркуляцию жидкости при комнатной температуре (при выключенном нагревателе) либо при повышенной температуре, обеспечиваемой системой регулирования режима работы термостата. Температура жидкости измеряется термометром 8. При установившемся равновесном состоянии газа в капилляре температуры протекающей жидкости и исследуемого газа одинаковы.

Уровень ртути в капилляре фиксируется через прозрачные

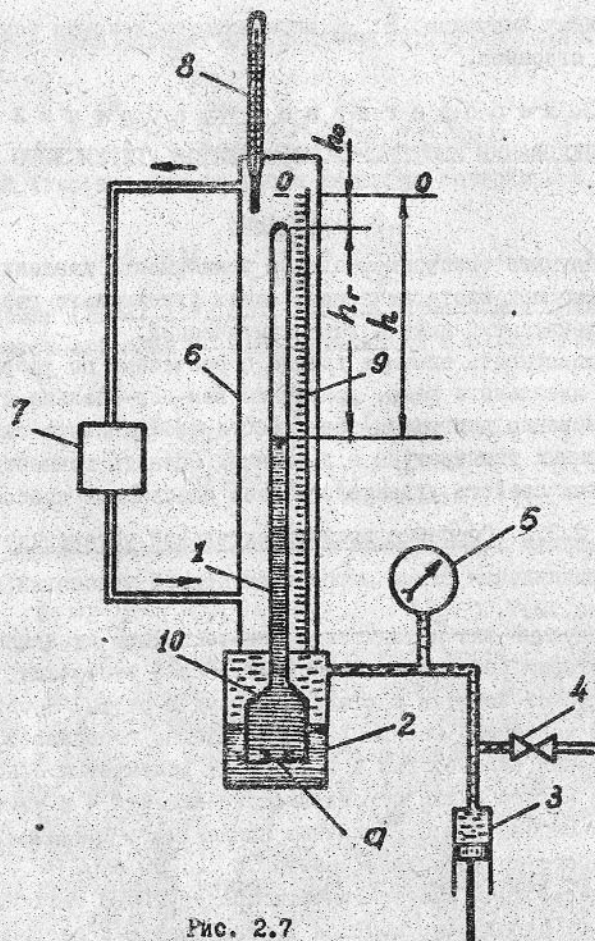


Рис. 2.7

стенки резервуара 6. Вблизи капилляра размещена шкала 9, служащая для измерения длины  $h_r$  части капилляра, занятой газом. Если обеспечена герметичность гидравлической системы установки, то при равновесном состоянии исследуемого газа определяются давление, температура и занимаемая им длина капилляра  $h_r$ , т.е. величина, прямо пропорциональная объему газа.

### 2.3.3. Измеряемые величины и порядок проведения эксперимента

В ходе эксперимента требуется при определенной температуре и различных установившихся давлениях измерить длину капилляра  $h_r$ , занимаемую газом после достижения им равновесного состояния. Эксперимент проводится в такой последовательности:

1. Зафиксировать на шкале 9 отметку  $h_0$ , соответствующую верхнему концу внутреннего канала капилляра. Включить циркуляцию воды через термостат с выключенным нагревом, измерить температуру  $T$  по термометру 8. С помощью поршневого насоса 3 поднять давление так, чтобы уровень ртути достиг видимой части капилляра I. Измерить величину  $P$  и отметку  $h$  по шкале против уровня ртути.

2. Далее давление повышать ступенями, чтобы уровень ртути поднимался приблизительно на 10 делений по шкале. После установления равновесного состояния записывать новые значения  $P$  и  $h$ . Необходимо учитывать, что в момент повышения давления газ нагревается и лишь через некоторое время в результате теплообмена со стенками принимает прежнюю температуру: в течение этого времени состояние газа неравновесно, объем его несколько изменяется, что отражается, в свою очередь, и на давлении в системе "исследуемый газ-манометр". Измерения выполнять после достижения газом равновесного состояния.

3. При проведении опыта обратить внимание на начало конденсации газа во время его сжатия при температуре ниже критической. Повышение давления следует прекращать при появлении конденсата или достижении давления 70...80 бар, если сжатие осуществляется при температуре выше критической.

4. После окончания опыта вновь измерить температуру воды. Если показание термометра отличается от начального, то для обработки результатов измерений взять среднее значение.

5. После окончания этапа 4 уменьшить давление с помощью дросселя 4 так, чтобы объем газа стал приблизительно равным первоначальному, и перейти к опыту при другой температуре. Для этого следует включить нагреватель термостата и установить температуру циркулирующей жидкости выше критической.

Критические параметры углекислого газа характеризуются сле-

дующими значениями:

критическая температура  $T_{кр} = 304,2 \text{ К}$ ;

критическое давление  $P_{кр} = 73,82 \text{ бар}$ ;

критический удельный объем  $v_{кр} = 0,002137 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

#### 2.3.4. Методика обработки результатов эксперимента

По результатам измерений устанавливают табличную форму зависимости удельного объема  $v$  исследуемого газа от абсолютного значения давления  $P$ .

Учитывая, что показание образцового манометра  $P_m$  определяет избыточное давление газа в капилляре, абсолютное давление находят как сумму избыточного и атмосферного давлений,  $\text{Н/м}^2$ :

$$P = P_0 + P_m. \quad (2.38)$$

Если диаметр капилляра  $d_k$  постоянен по его длине, то

$$v = \frac{(h-h_0)\pi d_k^2}{4M} = (h-h_0)K = K \cdot h_r, \quad (2.39)$$

где  $(h-h_0)$  — разность отметок уровня ртути и верхнего конца внутреннего канала капилляра,  $h_r = h - h_0$  — длина канала капилляра, занятая газом;  $M$  — масса помещенной в капилляр углекислоты.

Величина  $K = \frac{\pi d_k^2}{4M}$ ,  $\text{м}^3/(\text{кг} \cdot \text{дел.})$  является для конкретной экспериментальной установки постоянной.

Вычисленные таким образом для каждой из установленных в опытах температур значения  $P$  и  $v$  заносят в соответствующие графы таблицы и затем наносят точками на  $P-v$  диаграмме для представления уравнения состояния углекислого газа в графической форме.

2. В таблицу и на этот же график наносят значения  $P$ , полученные по уравнению состояния идеального газа (2.2), уравнению Ван-дер-Ваальса (2.20) и данным диаграммы, приведенной на рис. 2.3. Для определения констант, входящих в уравнения (2.2) и (2.20), применительно к описанию углекислого газа необходимо использовать следующие данные:  $R = R_u/\mu = 8314/44 = 189, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  
 $a = 190 \text{ Дж}^2/\text{кг}^2$ ,  $b = 0,00098, \text{ м}^3/\text{кг}$ .

3. Оценивают справедливость использованных форм представ-

ления термических свойств газа применительно к условиям выполненного экспериментального исследования.

#### 2.4. Контрольные вопросы

1. Что называется термическим уравнением состояния?
2. Какой газ является идеальным?
3. Написать зависимость между  $P$ ,  $V$  и  $T$  для двух киломолей идеального газа.
4. Может ли газовая постоянная какого-либо газа быть больше универсальной газовой постоянной?
5. Вычислить универсальную газовую постоянную, приняв, что при нормальных условиях (давлении 760 мм.рт.ст. и температуре  $0^\circ\text{C}$ ) объем одного киломоля идеального газа равен  $22,4 \text{ м}^3$ .
6. Можно ли записать для компонента смеси идеальных газов уравнение состояния в виде  $P_i V_i = M_i R_i T$ , где  $P_i, V_i$  - парциальное давление и парциальный объем компонента? Если нельзя, то в каких формах можно записать уравнение состояния для одного из компонентов смеси?
7. Определить парциальное давление кислорода в воздухе при нормальных условиях, приняв, что объемный состав воздуха - 79%  $\text{N}_2$  и 21%  $\text{O}_2$ .
8. Исходя из уравнения состояния компонента смеси, показать, что  $P_i V = P \cdot V_i$ .
9. Как определить газовую постоянную смеси?
10. Исходя из уравнений состояния смеси и отдельного компонента, показать, что  $Z_i = p_i$ , где  $p_i = N_i / N$  - мольная доля компонента.
11. Каковы особенности протекания изотермы при критической температуре?
12. Заданы масса газа, его температура и давление. Как найти объем газа, пользуясь уравнением Ван-дер-Ваальса?
13. Какими основными факторами определяется погрешность экспериментального определения удельного объема в лабораторных работах № 1 и 2?
14. Получить связь между массовыми и объемными долями компонента в идеальной газовой смеси.

## 3. ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

3.1. Общие положения

Первое начало термодинамики представляет собой приложенный к термодинамическим системам фундаментальный закон о сохранении и превращении энергии. Сущность этого закона состоит в том, что энергия термодинамической системы может быть изменена только при ее взаимодействии с окружающей средой, сопровождающемся энергообменом в форме теплоты, работы и с переносом вещества.

3.1.2. Аналитические выражения первого начала термодинамики

В зависимости от вида термодинамической системы и выбора координат (системы отсчета), в которой она рассматривается, аналитические выражения сущности первого начала термодинамики записывают в различной форме.

I. Для закрытой термомеханической термодинамической системы в сопутствующей (подвижной) системе координат первое начало термодинамики можно выразить следующим образом:

$$\delta q = du + \delta \ell; \quad (3.1)$$

$$\delta q = du + p dv - \delta \ell_{\text{аис}}; \quad (3.2)$$

$$\delta q = di - v dp - \delta \ell_{\text{аис}}, \quad (3.3)$$

где  $\delta q$ ,  $\delta \ell$  - бесконечно малые удельные количества теплоты и деформационной работы, Дж/кг;

$\delta \ell_{\text{аис}}$  - удельная работа диссипации, Дж/кг (для обратимых процессов  $\delta \ell_{\text{аис}} = 0$ );

$du$ ,  $di$  - приращения удельных значений внутренней энергии и энтальпии, Дж/кг;

$p$ ,  $v$  - давление, Па, и удельный объем, м<sup>3</sup>/кг;

Выражения (3.1) - (3.3) можно представить в интегральной форме. Например, соотношение (3.1) в такой форме записывается следующим образом:



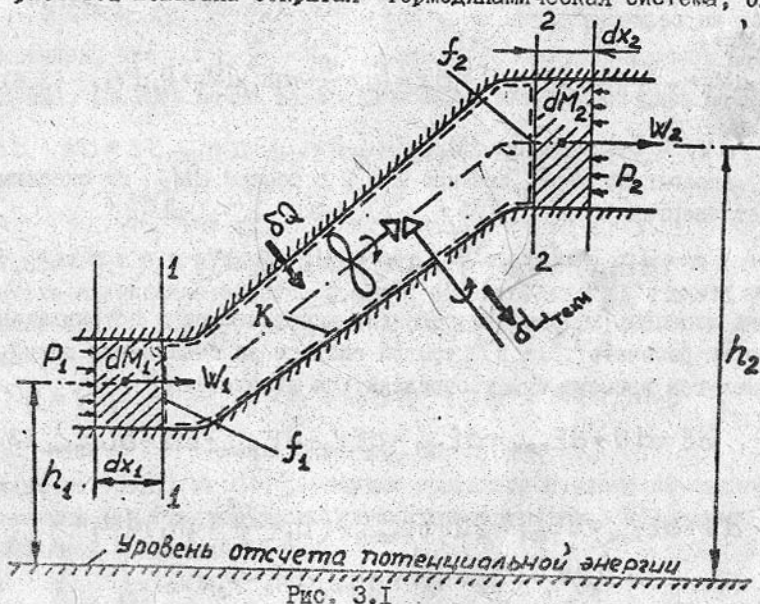
$$q_{1-2} = u_2 - u_1 + l_{1-2}. \quad (3.4)$$

Здесь индексы 1 и 2 относятся к начальному и конечному состояниям системы, а индекс 1-2 - к процессу.

Для системы в целом, содержащей  $M_{кг}$  рабочего тела,

$$Q_{1-2} = U_2 - U_1 + L_{1-2}. \quad (3.5)$$

2. В качестве границ термодинамической системы можно принять контур определенного связанного с наблюдателем объема. Через этот контур происходят энергообмен и массообмен с окружающей средой. Такая термодинамическая система называется открытой. На рис. 3.1 показана открытая термодинамическая система, ограни-



ченная контуром "К" и имевшая один канал подвода и один канал отвода масс.

Изменение запаса энергии рассматриваемой открытой термодинамической системы определяется ее энергообменом через границы системы в форме теплоты, работы и с потоком вещества.

За бесконечно малый промежуток времени энергообмен осуществляется через боковые поверхности канала в форме теплоты  $\delta Q$  и технической работы  $\delta L_{\text{техн}}$ , а также через сечения I— I и 2— 2 в связи с вводом и выводом масс  $dM_1$  и  $dM_2$ , а также соответствующей им энергии.

Работа, связанная с вводом массы  $dM$  в контрольный объем, определяется произведением силы  $P_1 f_1$  ( $f_1$  — площадь поперечного сечения канала) на перемещение границы массы  $dx_1$ , т.е.

$$\delta L_{\text{вх}1} = P_1 f_1 dx_1.$$

Кроме того, с массой  $dM$  в контрольный объем вносится внутренняя, кинетическая и потенциальная энергии этой массы. Тогда в связи с поступлением массы  $dM_1$  энергия системы пополнится на величину

$$dE_{\text{вх}} = \left(u_1 + \frac{W_1^2}{2} + gh_1\right) dM_1 + P_1 f_1 dx_1 = \left(u_1 + \frac{W_1^2}{2} + gh_1\right) dM_1 + P_1 dV_1, \quad (3.6)$$

где  $dV_1$  — объем массы  $dM_1$ .

Аналогично через сечение 2— 2 с массой  $dM_2$  из системы уйдет энергия

$$dE_{\text{вых}} = \left(u_2 + \frac{W_2^2}{2} + gh_2\right) dM_2 + P_2 dV_2. \quad (3.7)$$

Тогда изменение запаса внутренней, кинетической и потенциальной энергии рабочего тела в открытой системе за бесконечно малый промежуток времени будет определяться выражением

$$dE = dU + dE_{\text{кин}} + dE_{\text{пот}} = dE_{\text{вх}} - dE_{\text{вых}} + \delta Q - \delta L_{\text{техн}} \quad (3.8)$$

или

$$dU + dE_{\text{кин}} + dE_{\text{пот}} = \delta Q - \delta L_{\text{техн}} + \left(u_1 + \frac{W_1^2}{2} + gh_1\right) dM_1 + P_1 dV_1 - \left(u_2 + \frac{W_2^2}{2} + gh_2\right) dM_2 - P_2 dV_2. \quad (3.9)$$

За конечный промежуток времени при постоянстве параметров в сечениях I— I и 2— 2 энергия рабочего тела в контрольном объеме изменится на величину

$$\Delta E = \Delta U + \Delta E_{\text{кин}} + \Delta E_{\text{пот}} = Q_{1-2} - L_{\text{техн}, 1-2} + \left(u_1 + \frac{W_1^2}{2} + gh_1\right) M_{\text{вх}} + P V_{\text{вх}} - \left(u_2 + \frac{W_2^2}{2} + gh_2\right) M_{\text{вых}} - P_2 V_{\text{вых}}, \quad (3.10)$$

где  $M_{вх}$ ,  $M_{вых}$ ,  $V_{вх}$ ,  $V_{вых}$  - массы и объемы рабочего тела, поступающие в контрольный объем и покидающие его за конечный промежуток времени.

Вводя понятие энтальпии, приведем (3.10) к виду

$$\Delta E = \Delta U + \Delta E_{кин} + \Delta E_{пот} = Q_{1-2} - L_{техн 1-2} + \left( i_1 + \frac{W_1^2}{2} + gh_1 \right) M_{вх} - \left( i_2 + \frac{W_2^2}{2} + gh_2 \right) M_{вых}. \quad (3.10a)$$

Обобщая выражение на  $n$  входящих в систему потоков и на  $m$  выходящих из нее, получим

$$\Delta E = \Delta U + \Delta E_{кин} + \Delta E_{пот} = Q_{1-2} - L_{техн 1-2} + \sum_{k=1}^n M_{вх k} \left( i_{вх} + \frac{W_{вх}^2}{2} + gh_{вх} \right)_k - \sum_{k=1}^m M_{вых k} \left( i_{вых} + \frac{W_{вых}^2}{2} + gh_{вых} \right)_k. \quad (3.10б)$$

Учитывая, что  $i + \frac{W^2}{2} = i^*$ , где  $i^*$  - энтальпия заторможенного потока, (3.10б) можно записать в более лаконичной форме:

$$\Delta E = \Delta U + \Delta E_{кин} + \Delta E_{пот} = Q_{1-2} - L_{техн 1-2} + \sum_{k=1}^n M_{вх k} (i_{вх}^* + gh_{вх})_k - \sum_{k=1}^m M_{вых k} (i_{вых}^* + gh_{вых})_k. \quad (3.10в)$$

При стационарном (установившемся) потоке накопление энергии и массы в контрольном объеме не происходит ( $dE = 0, dM_1 = dM_2 = dM$ ). Тогда уравнение (3.9) примет вид

$$\delta Q = \left( u_2 + \frac{W_2^2}{2} + gh_2 \right) dM + P_2 dV_2 - \left( u_1 + \frac{W_1^2}{2} + gh_1 \right) dM - P_1 dV_1 + \delta L_{техн}. \quad (3.11)$$

Разделив (3.11) на  $dM$ , получим уравнение первого начала термодинамики для стационарного потока газа в системе координат, связанной с каналом, в виде

$$q_{1-2} = \left( u_2 + \frac{W_2^2}{2} + gh_2 + P_2 v_2 \right) - \left( u_1 + \frac{W_1^2}{2} + gh_1 + P_1 v_1 \right) + l_{техн 1-2}. \quad (3.12)$$

или, учитывая, что  $u + Pv = i$ , где  $i$  - удельная энтальпия,

$$q_{1-2} = (i_2 - i_1) + \left( \frac{W_2^2}{2} - \frac{W_1^2}{2} \right) + l_{техн 1-2} + g(h_2 - h_1). \quad (3.13)$$

Если сечения 1 - 1 и 2 - 2 расположены на бесконечно близком расстоянии, уравнение (3.13) можно представить в дифференциальной форме:

$$\delta q = di + d\left(\frac{w^2}{2}\right) + \delta l_{\text{техн}} + gdh. \quad (3.14)$$

Таким образом, энергия, подведенная в форме теплоты к стационарному потоку рабочего тела, расходуется на изменение его энтальпии, кинетической и потенциальной энергии и совершение технической работы.

Отметим, что работа диссипации явно в (3.14) не входит, так как энергобаланс в этом соотношении выражался через параметры на границах контрольной поверхности. Диссипация может проявляться в изменении этих параметров, а также в перераспределении величин, входящих в уравнение.

Вводя понятие об удельной энтальпии заторможенного потока (полной энтальпии)  $i^* = i + \frac{w^2}{2}$ , можно представить (3.14) в форме

$$\delta q = di^* + \delta l_{\text{техн}} + gdh. \quad (3.15)$$

Последний член в (3.15) весьма мал при описании потоков газа в элементах авиадвигателей, и им пренебрегают. Тогда

$$\delta q = di^* + \delta l_{\text{техн}}. \quad (3.16)$$

Из (3.16) следует, что полная энтальпия потока может изменяться только при его энергообмене с окружающей средой в форме теплоты и технической работы.

В рассмотренных уравнениях приращение удельной энтальпии идеального газа выражают следующим образом:

$$di = c_p dT. \quad (3.17)$$

Тогда (3.14) и (3.15) приобретают вид

$$\delta q = c_p dT + d\left(\frac{w^2}{2}\right) + \delta l_{\text{техн}} + gdh, \quad (3.18)$$

$$\delta q = c_p dT^* + \delta l_{\text{техн}} + gdh, \quad (3.19)$$

где величину

$$T^* = T + \frac{W^2}{2C_p} \quad (3.20)$$

называют температурой торможения, или полной температурой.

Записывая дополнительно к (3.14) уравнение первого начала в сопутствующей системе координат (3.3) и исключая калорические члены  $\delta q$  и  $di$ , можно представить уравнение первого начала для потока рабочего тела в механической форме:

$$\delta \ell_{пв} = -v dp = d\left(\frac{W^2}{2}\right) + \delta \ell_{техн} + g dh + \delta \ell_{аис}, \quad (3.21)$$

где  $\delta \ell_{пв}$  — элементарная удельная полезная внешняя работа потока, которая, как видно, расходуется на изменение кинетической и потенциальной энергии потока, совершение технической работы и работы диссипации.

Ниже приведено описание лабораторных работ, при выполнении которых для решения поставленных задач используется первое начало термодинамики в различных формах его аналитического выражения.

### 3.2. Лабораторная работа № 3

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ ПОТОКА В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ

Вихревая труба представляет собой устройство, в котором сжатый газ расширяется в сопле с увеличением скорости и разделяется на два потока с разной полной температурой. Один из этих потоков характеризуется более высокой, чем исходная, полной температурой (горячий поток), а второй — более низкой (холодный поток). Такое разделение потоков обеспечивается при организации вращательного движения газа в вихревой камере. Для этого сопло исходного потока размещают тангенциально относительно оси камеры. Холодный и горячий потоки покидают вихревую камеру через разные патрубки. Если в вихревую трубу направить газ с температурой, близкой к температуре окружающей среды, то температура холодного потока существенно снизится относительно температуры окружающей

среды. Таким образом, вихревую трубу можно использовать в качестве источника холодного газа, обеспечивающего отвод теплоты от тел с температурой, более низкой, чем температура окружающей среды, т.е. в качестве основного устройства холодильной установки. Температуры холодного и горячего потоков зависят от перераспределения массовых расходов между ними. В данной лабораторной работе необходимо конкретизировать эту зависимость.

### 3.2.1. Задание

Измерить температуры холодного и горячего потоков в вихревой трубе и получить их экспериментальную зависимость от степени массового разделения исходного потока в вихревой трубе.

### 3.2.2. Описание экспериментальной установки

Сжатый воздух подводится к установке (рис. 3.2) от компрессора при давлении  $P_{вх}$  и температуре  $T_{вх}^*$ . Поток ускоряется в сопле 1 вихревой трубы, затем через отверстие 2 поступает тангенциально в вихревую камеру 3. Камера имеет два выхода: периферийный регулируемый "г" и центральный "х" в диафрагме, установленной вблизи отверстия 2. В результате газотермодинамических процессов, происходящих в завихренном потоке, через выход "г" отводится поток с повышенной температурой  $T_g^*$ , а через выход "х" - с пониженной температурой  $T_x^*$ . Эффект разделения потока зависит от параметров подводимого воздуха и площади проходных сечений на выходах из трубы. Изменять режим работы вихревой трубы можно с помощью регулировочного винта 4, варьируя площадь выхода "г".

Температуры  $T_{вх}^*$ ,  $T_g^*$ ,  $T_x^*$ , а также температура корпуса трубы  $T_k$  измеряются с помощью хромель-копелевых термопар 5 и милливольтметра 6 с переключателем 7. Свободные спаи термопар помещены в сосуд с температурой  $T_0$ , измеряемой термометром 8. Камеры 9, 10 предназначены для шумоглушения.

### 3.2.3. Порядок проведения эксперимента

1. Включить компрессор. При фиксированном положении винта 4 выждать наступление установившегося режима работы трубы (установление неизменного значения температуры  $T_k$ ). Измерить ЭДС

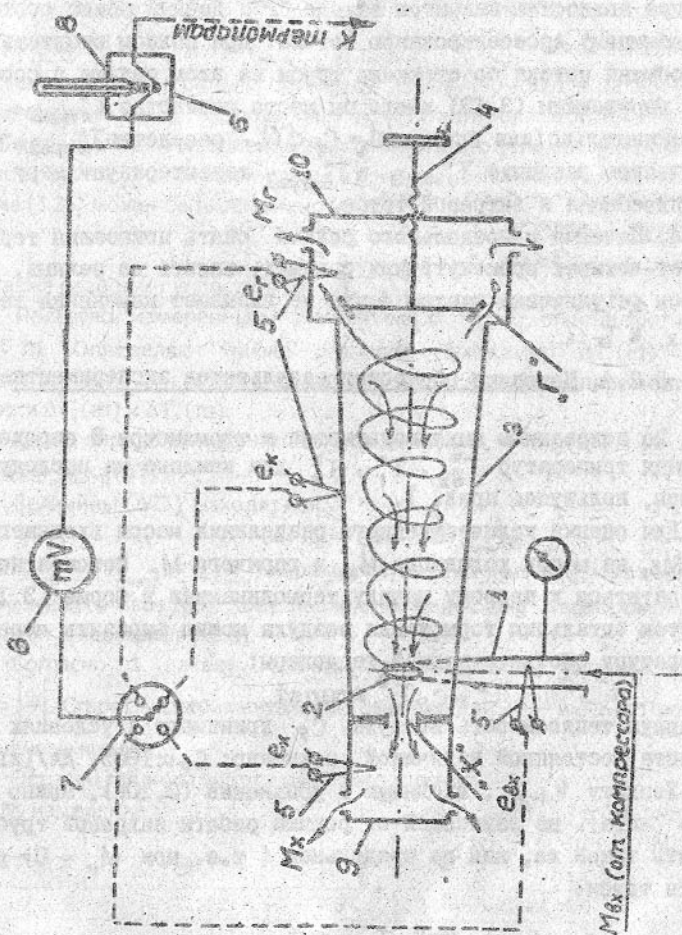


Рис. 3.2

Контроль температур в указанных точках установки осуществляется одной термопарой – щупом (медь – константан), для чего она последовательно вводится в соответствующие отверстия. Контроль температур корпуса трубы и свободных концов термопары не ведется (за ненадобностью).

термопар  $E_{Bx}$ ,  $E_r$ ,  $E_x$ , температуру  $T_0$  и давление  $P_{Bx}$ .

2. С помощью винта 4 перейти на следующий режим.

3. Эксперимент целесообразно начинать с предельного режима, т.е. при полностью закрытом выходе "г". Данный режим соответствует обычному дросселированию потока. При полном отсутствии теплообмена потока со стенками трубы на этом режиме в соответствии с выражением (3.13) имело бы место равенство  $i_{x,пред}^* = i_{Bx,пред}^*$  и, следовательно, (для воздуха  $d_{г} = C_p dT$ ), - равенство  $T_{x,пред}^* = T_{Bx,пред}^*$ . Фактическое различие  $T_{x,пред}^*$  и  $T_{Bx,пред}^*$  характеризует меру внешне-го теплообмена в вихревой трубе.

4. Начиная с предельного режима снять показания термопар на трех-четырех промежуточных режимах, вплоть до режима, на котором регулировка винтом 4 уже не вызывает изменения температур  $T_x$  и  $T_r$ .

#### 3.2.4. Методика обработки результатов эксперимента

По показаниям милливольтметра и термометра 8 определяют значения температур  $T_{Bx}^*$ ,  $T_r^*$ ,  $T_x^*$  для каждого из исследуемых режимов, пользуясь прил. I.

Для оценки количественного разделения массы входящего потока  $M_{Bx}$  на массу холодного  $M_x$  и горячего  $M_r$  потоков необходимо обратиться к первому началу термодинамики в форме (3.10в). При этомenthalпию торможения воздуха можно выразить через температуру соответствующей термопары:

$$i^* = C_p T^* \pm const.$$

Изобарную теплоемкость воздуха  $C_p$  принимают в условиях данного опыта постоянной величиной, а именно:  $C_p \approx 1005$ , Дж/(кг·К).

Теплоту  $Q_{1-2}$ , входящую в уравнение (3.10в), можно приближенно считать не зависящей от режима работы вихревой трубы и принять такой же, как на предельном (т.е. при  $M_r = 0$ ) режиме работы трубы:

$$Q = M_{Bx} C_p (T_{x,пред}^* - T_{Bx,пред}^*). \quad (3.22)$$

Здесь сделано допущение о том, что перераспределение расходов выходящих из трубы потоков не влияет на гидросопротивление входящему потоку. Тогда  $M_{Bx,пред} = M_{Bx}$ .



### Методика обработки результатов эксперимента.

(В дополнение к методике 3.2.4 и во изменение в связи с коррекцией установки.)

Для определения  $m$  по (3.25) удобнее подставлять не отдельные величины, а их разности  $(T_r^* - T_{вх}^*)$ ,  $(T_{хпред}^* - T_{вхпред}^*)$ ,  $(T_r^* - T_x^*)$ , что при выполнении условия неизменности температуры свободных спаев термопары за время измерения блока величин  $E_r, E_{вх}, E_x$ , позволяет уйти от контроля этой температуры и упростить расчеты. При выполнении дополнительного условия линейности градуировочной характеристики термопары в диапазоне температур эксперимента выражение (3.25) может быть заменено на

$$\bar{m} = \frac{E_r - E_{вх} + E_{вхпред} - E_{хпред}}{E_r - E_x}, \quad (3.25')$$

что также позволяет упростить расчет.

Пользуясь измеренными значениями  $E_r, E_{вх}, E_x$ , определяют соответствующие  $m$ . Определяют также разности температур  $\Delta T_x^*(m) = (T_x^* - T_{вх}^*)$  и  $\Delta T_r^*(m) = (T_r^* - T_{вх}^*)$  соответствующих потоков. Строят экспериментальные зависимости  $\Delta T_x^*(m)$  и  $\Delta T_r^*(m)$ .

Далее определяют теплоты а) отведенную  $q_x = mc_p(\Delta T_x^*)'$  и б) подведенную  $q_r = (1 - m)c_p(\Delta T_r^*)'$ .

Величины  $(\Delta T^*)'$  находят как:

$$(\Delta T^*)' = (\Delta T^* - \Delta T_{хпред}^*),$$

где  $\Delta T_{хпред}^* = (T_{хпред}^* - T_{вхпред}^*)$  характеризует неконтролируемые тепловые потери используемого воздуха, обусловленные внешним теплообменом в трубе (см. пункт 3 параграфа 3.2.3).

Согласно 1 началу термодинамики должно выполняться равенство  $\left| \frac{q_x}{c_p} \right| = \left| \frac{q_r}{c_p} \right|$ . Строят экспериментальные зависимости  $\frac{q_r(m)}{c_p}$  и  $\frac{q_x(m)}{c_p}$ . Проводят анализ полученных кривых.

Образец таблицы эксперимента и расчетов.

№ измерения		1	2	3	4	5	6 (Предельный режим $M_{гер} = 0$ )
мкВ	$E_{вх}$						
	$E_r$						
	$E_x$						
	$m$						
°C	$\Delta T_r^*$						
	$(\Delta T_r^*)'$						
	$\Delta T_x^*$						
	$(\Delta T_x^*)'$						
	$\frac{q_r}{c_p}$						
	$\frac{q_x}{c_p}$						

Для стационарного режима работы вихревой трубы при отсутствии технической работы и изменения потенциальной энергии выражение (3.10в) с учетом (3.22) примет вид

$$Q = M_{\text{вх}} C_p (T_{\text{х.п.р.е.д.}}^* - T_{\text{вх.п.р.е.д.}}^*) = M_r C_p T_r^* + M_x C_p T_x^* - M_{\text{вх}} C_p T_{\text{вх.}}^* \quad (3.23)$$

Приняв во внимание, что

$$M_{\text{вх}} = M_x + M_r \quad (3.24)$$

и вводя в рассмотрение степень массового разделения потоков

$m = M_x / M_{\text{вх}}$ , из (3.23) и (3.24) получим (убедиться самостоятельно)

$$m = \frac{T_r^* - T_{\text{вх.}}^* + T_{\text{вх.п.р.е.д.}}^* - T_{\text{х.п.р.е.д.}}^*}{T_r^* - T_x^*} \quad (3.25)$$

Пользуясь результатами измерений и расчетов, строят экспериментальные зависимости температур холодного и горячего потоков от степени их массового разделения.

### 3.3. Лабораторная работа № 4 ЗАПОЛНЕНИЕ ВАКУУМИРОВАННОГО СОСУДА АТМОСФЕРНЫМ ВОЗДУХОМ

#### 3.3.1. Задание

1. Измерить изменение температуры в вакуумированном сосуде при заполнении его атмосферным воздухом.
2. Сравнить измеренную температуру с температурой, которая была бы достигнута при адиабатном заполнении.
3. Оценить количество воздуха, поступающее в сосуд при заполнении.

#### 3.3.2. Описание экспериментальной установки

Внутренняя полость сосуда сферической формы I с помощью пробковых кранов 2 и 3 соединяется с вакуум-насосом или атмосферой (рис. 3.3). Внутренний объем сферы с присоединенными объемами равен  $V = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ . Внутри сферы на равных радиусах расположены шесть термопар 5, соединенных последовательно для усиления и осреднения сигнала. Сигнал от термопар поступает

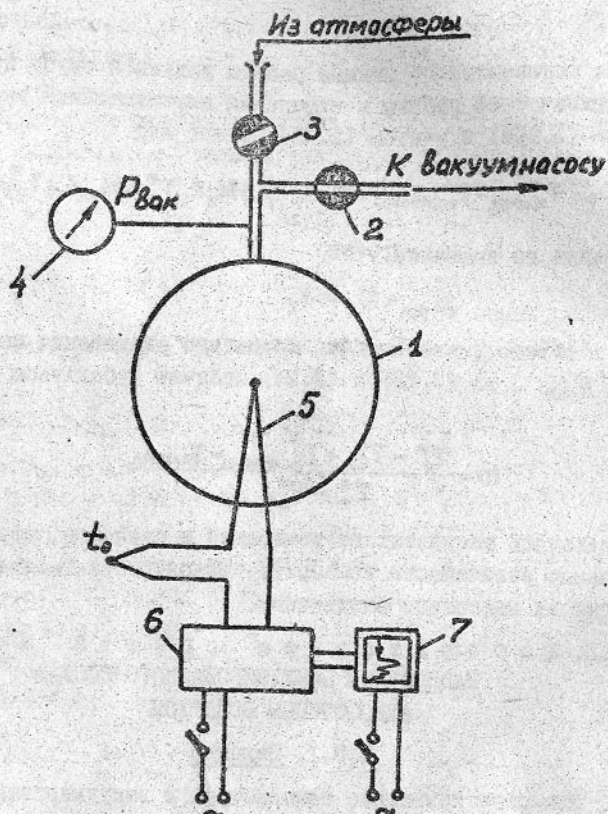


Рис. 3.3

через усилитель 6 на записывающее устройство 7. Давление в сфере измеряется вакуумметром 4.

### 3.3.3. Порядок проведения эксперимента

В ходе эксперимента следует создать разрежение в сфере, затем соединить полость с атмосферой и зарегистрировать с помощью записывающего устройства изменение осредненной температуры воздуха.

Последовательность действий такая:

1. Включить питание для прогрева усилителя. Через 7...10 минут после этого закрыть кран 3, открыть кран 2 и включить ваку-

ум-насос. После достижения установившегося давления закрыть кран 2, выключить вакуум-насос, записать показания вакуумметра  $P_{\text{вак}}$ .

2. Включить протяжку ленты записывающего устройства. Открыть кран 3. Следить за показаниями записывающего устройства: вначале отмечается повышение температуры, затем в результате теплообмена поступившего воздуха со стенками сосуда - спад температуры до начального значения.

3. При достижении начального значения температуры выключить записывающее устройство.

4. Измерить атмосферное давление  $P_0$  и температуру воздуха вблизи сферы  $T_0$ .

### 3.3.4. Методика обработки результатов эксперимента

На записанной температурной кривой должны наблюдаться повышение температуры в сфере при выравнивании в ней давления до уровня атмосферного и последующее понижение температуры, вызванное теплообменом. На кривой отмечают максимальное отклонение  $h_{\text{max}}$  от исходного уровня, соответствующего температуре окружающей среды. На диаграммной ленте записывающего устройства по величине  $h_{\text{max}}$  определяют температуру  $T_{\text{max}}$ . Для этого следует воспользоваться приведенной на рис. 3.4 тарировочной зависимостью  $\Delta t = f(h)$ , где  $\Delta t$  - разность температур термомпар и окружающей среды;  $h$  - отклонение пера самописца от линии исходного уровня.

Примечание. Тарировочная зависимость получена в статических условиях, и найденное описанным способом значение  $T_{\text{max}}$  содержит некоторую ошибку, обусловленную инерционностью термомпары и других элементов регистрирующей системы. Значение  $T_{\text{max}}$  несколько меньше фактического значения температуры, достигаемой к моменту выравнивания давления в полости с атмосферным давлением.

Определяют температуру  $T_{\text{ад}}$ , которая установилась бы в сфере при адиабатном заполнении, т.е. при отсутствии теплообмена газа со стенками сосуда. Для этого необходимо обратиться к закону сохранения энергии в виде (3.106), приняв  $Q = 0$ ,  $i = C_p T$ ,  $u = C_v T$  ..., где  $C_p$  и  $C_v$  - постоянные в условиях данного опыта изобарная и изохорная теплоемкости воздуха. Кроме

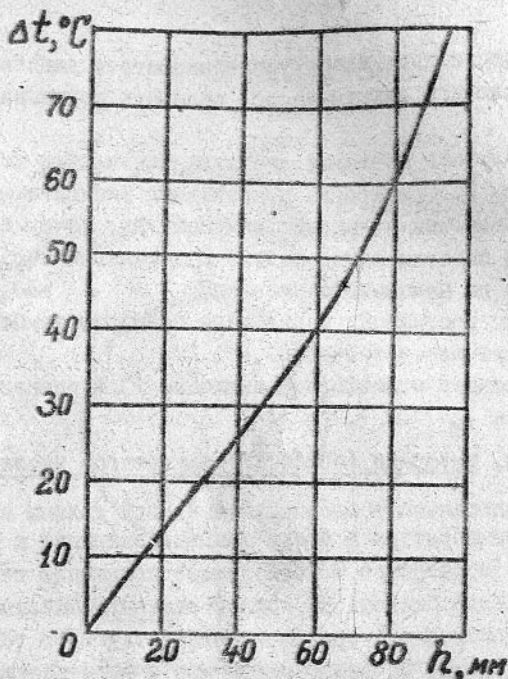


Рис. 3.4

того,  $\Pi = I, M_{\text{вх}} = 0, L_{\text{техн}} = 0, \Delta E_{\text{кин}} = 0, \Delta E_{\text{пот}} = 0$ . Тогда

$$(M_{\text{вх.ад}} + M_0) c_v T_{\text{ад}}^* - M_0 c_v T_0 = M_{\text{вх.ад}} c_p T_{\text{вх}}^* \quad (3.26)$$

Входящие в данное уравнение величины взаимосвязаны также уравнением состояния

$$P_0 V = (M_{\text{вх.ад}} + M_0) R T_{\text{ад}}^*, \quad P_{\beta} V = M_0 R T_0, \quad (3.27)$$

где  $P_{\beta} = P_0 - P_{\beta \text{ак}}$  - давление в сфере до заполнения;

$R$  - газовая постоянная воздуха (287 Дж/(кг·К)).

Температуру  $T_{\text{ад}}$  определяют из приведенных уравнений (убедиться в этом самостоятельно):

$$T_{\text{ад}}^* = T_0 \frac{k}{1 + (k-1) P_{\beta} / P_0}, \quad (3.28)$$

где  $k = c_p / c_v = 1,4$ .

Очевидно, величина  $T_{ад}^*$  больше фактически измеренного значения  $T_{max}$ .

Оценивают количество воздуха, поступившее в сферу к моменту достижения в сосуде атмосферного давления.

В результате теплообмена поступившего воздуха со стенками сферы его температура постепенно понижается до значения  $T_0$ .

Определяют также массу воздуха, поступившего в сферу после установления его теплового равновесия с окружающей средой.

### 3.4. Лабораторная работа № 5

#### ЭНЕРГОБАЛАНС В ТУРБОХОЛОДИЛЬНИКЕ

##### 3.4.1. Задание

Проверить баланс мощности турбины и мощности, потребляемой компрессором, в турбохолодильнике при различных режимах его работы.

##### 3.4.2. Описание экспериментальной установки

Для исследования энергетических характеристик термодинамических процессов в турбине и компрессоре используется экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 3.5.

В качестве объекта эксперимента выбран турбохолодильный агрегат 7 самолетной системы кондиционирования воздуха. Он состоит из турбины 6 и компрессора 17, рабочие колеса которых находятся на общем валу. Компрессор является потребителем технической работы турбины. Поэтому при пренебрежимо малых потерях механической энергии в подшипниках агрегата техническая работа потока газа в турбине равна работе привода компрессора.

Установка обеспечивает измерение термических параметров воздуха перед турбиной и компрессором и за ними, а также массовых расходов воздуха через эти устройства.

Сжатый до давления 0,2...0,4 МПа воздух через кран 1 поступает в регулирующий расход игольчатый вентиль 2 и далее в турбину 6. Контроль давления перед установкой осуществляется с помощью манометра 22. Перед турбиной с помощью образцового манометра 3 измеряется полное давление воздуха  $P_{т1}^*$ , а термопарой 4 (термоэлектродные материалы всех термопар хромель и конпель) с милливольтметром 5 - полная температура  $T_{т1}^*$ .

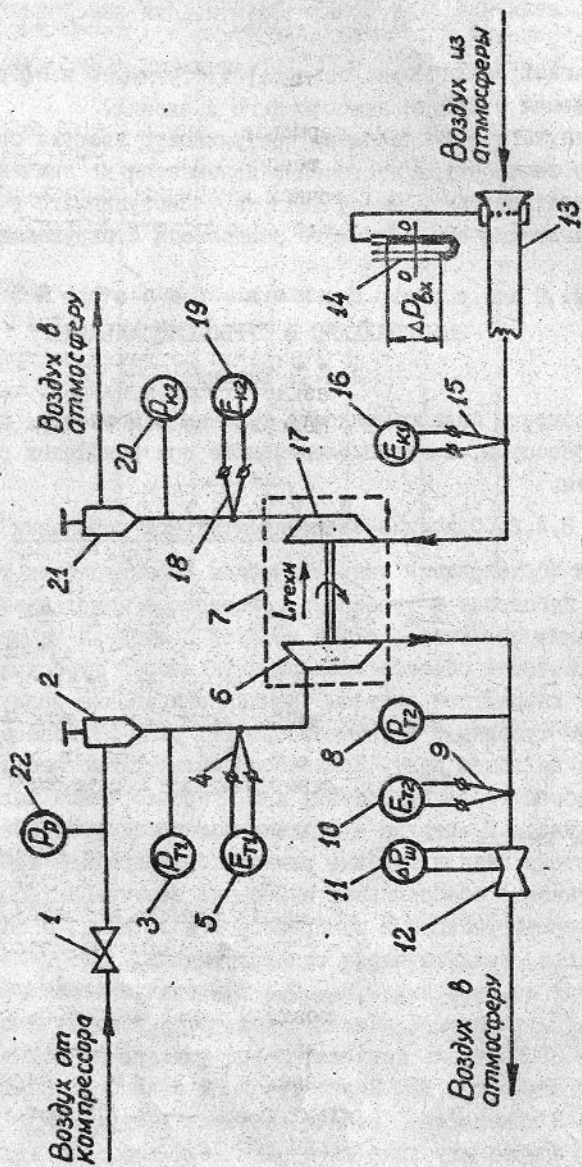


Рис. 3.5

Аналогичными приборами измеряются и соответствующие параметры за турбиной  $P_{T2}^*$  и  $T_{T2}^*$  (манометр 8 и термopара 9, милливольтметр 10).

"Холодные" спай всех термopар, имеющихcя на установке, расположены в термостате. Их температура  $T_{TC}$  контролируется термометром. Температуры в точках измерения определяются по соответствующей электродвижущей силе термopары и градуировочной таблице, приведенной в прил. I.

Дроссельная шайба 12, установленная в выхлопной трубе турбины, предназначена для измерения массового расхода протекающего через нее воздуха  $G_T$ . Перепад давления на дроссельной шайбе  $\Delta P_{ш}$  измеряется U-образным дифференциальным манометром II, который заполнен водой. Массовый расход воздуха находится по формуле

$$G_T = \alpha_{ш} f_{ш} \sqrt{2 \Delta P_{ш} \rho_{T2}} \quad (3.29)$$

Здесь  $\alpha_{ш} = 0,742$  - коэффициент расхода дроссельной шайбы;

$f_{ш} = 1,075 \cdot 10^{-3}$  - площадь поперечного сечения шайбы,  $m^2$ ,

$\rho_{T2}$  - плотность газа, определяющаяся по уравнению состояния идеального газа и измеренным перед шайбой параметрам  $P_{T2}^*$  и  $T_{T2}^*$ . Газовая постоянная воздуха принимается равной  $R = 287$  Дж/(кг·К).

Воздух из дроссельной шайбы поступает в атмосферу. Параметры атмосферы (давление  $P_0$  и температура  $T_0$ ) измеряются барометром и термометром, установленными в помещении лаборатории.

Воздух в компрессор 17 турбохолодильника попадает из атмосферы через расходомерный участок 13 с лемнискатным входом. За компрессором он проходит через игольчатый вентиль 21, предназначенный для регулирования давления за компрессором, и поступает в атмосферу.

Полное давление  $P_{к1}^*$  воздуха перед компрессором принимается равным атмосферному. Температура  $T_{к1}^*$  измеряется термopарой 15 и милливольтметром 16, давление  $P_{к2}^*$  за компрессором - образцовым манометром 20, а температура  $T_{к2}^*$  - с помощью хромель-копелевой термopары 18 и милливольтметра 19.

Массовый расход воздуха через компрессор определяется по перепаду полного и статического давлений в лемнискатном



входе 14, а этот перепад ( $\Delta P_{\text{вх}}$ ) — по показаниям дифференциального манометра 14, заполненного водой. При небольших дозвуковых скоростях движения газа во входном трубопроводе (что характерно для данной установки) газ можно с высокой точностью считать несжимаемым. Тогда по уравнению Бернулли скорость в выходном сечении лемнискатного входа

$$W_{\text{вх}} = \varphi_{\text{вх}} \sqrt{2\Delta P_{\text{вх}}/\rho_0} \quad (3.30)$$

а массовый расход газа

$$G_{\text{к}} = \varphi_{\text{вх}} f_{\text{вх}} \sqrt{2\Delta P_{\text{вх}}\rho_0} \quad (3.31)$$

В формуле (3.31)  $\varphi_{\text{вх}} = 0,98$  — коэффициент, учитывающий влияние диссипативных эффектов при течении воздуха во входном устройстве,  $f_{\text{вх}} = 1,88 \cdot 10^{-3}$  — площадь поперечного сечения подводящего трубопровода, м<sup>2</sup>;  $\rho_0$  — плотность воздуха при атмосферных условиях, которая с достаточной точностью может быть определена по термическому уравнению состояния идеального газа.

### 3.4.3. Порядок проведения эксперимента

1. Проверить исходное состояние вентилей 1, 2, 2I. Вентиль 2 должен быть закрыт, а вентили 1 и 2I полностью открыты.
2. Подать команду на запуск компрессора, питающего установку воздухом.
3. После достижения во входном трубопроводе избыточного давления 3,5...4 ати (контроль с помощью манометра 22) приоткрыть вентиль 2 и перед турбиной установить давление 1,5...2 ати.
4. На выходе из компрессора установить рекомендуемое преподавателем давление, прикрывая вентиль 2I.
5. Периодически проверяя показания приборов, вывести установку на стационарный режим работы.
6. Измерить значения ЭДС термомпар 4, 9, 15, 18, а также перепадов давлений на дроссельной шайбе  $\Delta P_{\text{ш}}$  и входном устройстве компрессора турбохолодильника  $\Delta P_{\text{вх}}$ . Зафиксировать параметры атмосферы  $P_0$ ,  $T_0$ , температуру холодных спаев термомпар в термостате  $T_{\text{тс}}$  и давление перед турбиной  $P_{\text{т1}}^*$ .

7. Изменить давление перед турбиной  $P_{T1}^*$  с помощью вентилей 2 и повторить измерения на пяти-шести стационарных режимах работы установки, варьируя избыточное давление перед турбиной в диапазоне 1,5...3 ат.

8. После завершения измерений подать команду на выключение питающего компрессора и после его выключения вентили 1, 2, 2I привести в исходное перед запуском установки состояние.

#### 3.4.4. Методика обработки результатов эксперимента

На исследованных режимах работы турбохолодильника вычисляют удельную техническую работу турбины  $\ell_T$  и работу привода компрессора  $\ell_K$ . Для этого следует обратиться к уравнению (3.14) и конкретизировать необходимые допущения. Далее определяют мощности турбины и привода компрессора:

$$N_T = G_T \ell_T, \quad N_K = G_K \ell_K.$$

В силу стационарности режима работы турбохолодильника в нем не происходит накопления энергии. Поэтому эти мощности должны быть одинаковы (если пренебречь теплообменом корпуса холодильника с окружающей средой). Чтобы проверить справедливость этого вывода, необходимо вычислить относительную ошибку в энергобалансе  $\delta_N = (N_T - N_K) / N_T$  и проанализировать возможные причины ее появления.

#### 3.5. Контрольные вопросы

1. В чем сущность первого начала термодинамики?
2. Какую работу называют деформационной (или работой расширения)?
3. Разъяснить смысл понятия ["техническая работа"]
4. Что называется работой проталкивания?
5. Что называется полезной внешней работой потока?
6. Почему в уравнение первого начала термодинамики для потока газа в форме (3.14) в явном виде не входит работа диссипации? Как изменится вид этого уравнения, если в него ввести эту работу?
7. Что называется внутренней энергией и энтальпией? Каков физический смысл этих понятий?
8. Какова связь между полезной внешней и деформационной

работами?

9. Записать аналитическое выражение первого начала термодинамики для открытой термомеханической термодинамической системы.

10. Записать аналитическое выражение первого начала термодинамики в системе координат, связанной с каналом, для случая протекания стационарного потока через местное гидравлическое сопротивление (например через полукрытый кран).

11. Какое течение потока в канале называют стационарным?

12. Какие допущения приняты при аналитическом выражении первого начала термодинамики в выполненной Вами лабораторной работе?

13. Разъяснить смысл понятия "температура торможения".

14. Разъяснить смысл понятия "энтальпия торможения".

15. Как найти температуру торможения идеального газа с постоянной изобарной теплоемкостью?

#### 4. ПОЛИТРОПНЫЕ ПРОЦЕССЫ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

##### 4.1. Общие положения

При термодинамическом расчете теплотехнических устройств реальные процессы в газах заменяют идеализированными обратимыми процессами, что позволяет выполнить их количественный анализ. Кроме того, оговаривают условия реализации конкретных процессов (например, постоянство объема, давления и др.)

##### 4.1.1. Условия реализации и уравнения политропного процесса

Рассмотрим процессы, в которых доля теплоты, расходуемой на изменение внутренней энергии, на всех стадиях процесса остается постоянной величиной, т.е.

$$\varphi = \frac{du}{\delta q} = \text{const.} \quad (4.1)$$

Коэффициент  $\varphi$  называют коэффициентом разветвления теплоты. Выражение (4.1) представляет собой условие реализации рассматриваемых процессов, причем  $\varphi$  в различных процессах может принимать значения в диапазоне  $-\infty < \varphi < +\infty$ . Для обеспечения

постоянства этого коэффициента в конкретном процессе необходимо поддерживать определенное соотношение между теплотой и работой при энергообмене газа с окружающей средой.

Из (4.1) следует (при допущении о постоянстве изохорной теплоемкости газа) постоянство теплоемкости процесса:

$$\varphi = \frac{du}{\delta q} = \frac{C_v dT}{C_n dT} = \text{const}$$

или

$$C_n = C_v / \varphi. \quad (4.2)$$

Таким образом, рассматриваемый класс процессов характеризуется постоянной теплоемкостью конкретного процесса, зависящей от выбранного значения коэффициента разветвления теплоты.

С учетом (4.2) получим уравнение процесса, т.е. связь между текущими параметрами в процессе.

Из первого начала термодинамики следует

$$\delta q = di - v dP, \quad (4.3)$$

$$\delta q = du + P d\upsilon. \quad (4.4)$$

Для идеальных газов

$$C_n dT = C_p dT - v dP, \quad (4.5)$$

$$C_n dT = C_v dT + P d\upsilon \quad (4.6)$$

или

$$(C_n - C_p) dT = -v dP, \quad (4.7)$$

$$(C_n - C_v) dT = P d\upsilon. \quad (4.8)$$

Разделим (4.7) на (4.8):

$$\frac{C_n - C_p}{C_n - C_v} = - \frac{v dP}{P d\upsilon}. \quad (4.9)$$

Обозначим

$$n = \frac{C_n - C_p}{C_n - C_v} = \text{const}. \quad (4.10)$$

Тогда

$$n = - \frac{v \, dP}{P \, dv} \quad (4.11)$$

После интегрирования дифференциального уравнения (4.11) получим связь между давлением и удельным объемом в процессе (уравнение процесса) в виде

$$Pv^n = \text{const.} \quad (4.12)$$

Процессы, подчиняющиеся уравнению (4.12), называются **политропными**. Показатель степени  $n$  в этом уравнении именуют **показателем политропы**. Ясно, что это уравнение является следствием принятого условия реализации таких процессов. Тогда можно дать и иное определение политропного процесса. В частности, политропным является процесс с постоянным на всех стадиях коэффициентом разветвления теплоты, или процесс с постоянной на всех стадиях теплоемкостью.

Если воспользоваться термическим уравнением состояния идеального газа  $Pv = RT$ , то уравнение политропного процесса можно записать и через иные термические параметры:

$$Tv^{n-1} = \text{const.}, \quad (4.13)$$

$$T = \text{const} P^{\frac{n-1}{n}}. \quad (4.14)$$

Из соотношений (4.12)-(4.14) следует связь между конечными и начальными параметрами газа в процессе:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^n, \quad \frac{v_2}{v_1} = \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{1/n}; \quad (4.15, a, \delta)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1}, \quad \frac{v_2}{v_1} = \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{1}{n-1}}; \quad (4.16, a, \delta)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}, \quad \frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{n}{n-1}}. \quad (4.17, a, \delta)$$

#### 4.1.2. Энергетические характеристики политропного процесса

Изменение внутренней энергии и энтальпии идеального газа определяется изменением температуры:

$$\Delta u_{1-2} = u_2 - u_1 = \int_1^2 c_v dT = c_v (T_2 - T_1), \quad (4.18)$$

$$\Delta i_{1-2} = i_2 - i_1 = \int_1^2 c_p dT = c_p (T_2 - T_1). \quad (4.19)$$

Деформационную работу можно выразить следующим образом:

$$\ell_{1-2} = \int_1^2 p dv = \int_1^2 \frac{p_1 v_1^n}{v^n} dv = \frac{p_1 v_1}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{n-1} \right], \quad (4.20)$$

или, с учетом (4.16) и (4.17),

$$\ell_{1-2} = \frac{RT_1}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right], \quad (4.21)$$

$$\ell_{1-2} = \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2). \quad (4.22)$$

Из (4.11) следует, что полезная внешняя работа газа в  $n$  раз больше деформационной, т.е.

$$\ell_{п.в. 1-2} = n \cdot \ell_{1-2}. \quad (4.23)$$

Теплоемкость политропного процесса выражается через показатель политропы из соотношения (4.10):

$$c_n = c_v \frac{n-k}{n-1}. \quad (4.24)$$

Тогда теплота процесса

$$q_{1-2} = \int_1^2 c_n dT = c_n (T_2 - T_1) = c_v \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1). \quad (4.25)$$

Изменение энтропии в процессе:

$$\Delta S_{1-2} = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta q}{T} = \int_1^2 \frac{c_n dT}{T} = c_n \ell_n \frac{T_2}{T_1} = c_v \frac{n-k}{n-1} \ell_n \frac{T_2}{T_1}. \quad (4.26)$$

#### 4.1.3. Частные случаи политропного процесса и его обобщающее значение

Задавая различные значения показателя политропы, можно получить множество конкретных процессов, характеризующихся различными значениями коэффициента разветвления теплоты и теплоем-

кости. Например, задав  $n = 0$ , получим изобарный процесс

$$P v^0 = P = \text{const.}$$

При  $n = \pm \infty$  политропа описывает изохорный процесс:

$$P v^n = \text{const}; P^n v = \text{const}; P^0 v = \text{const}; v = \text{const.}$$

Условие  $n = 1$  соответствует изотермическому процессу:

$$P v = \text{const.}$$

Если задать  $n = C_p/C_v = k$ , получим уравнение адиабатного процесса:

$$P v^k = \text{const.}$$

На рис. 4.1 изображены рассмотренные частные процессы, исходящие из произвольно выбранного начального состояния, и отвечающие им значения показателя политропы.

Таким образом, политропный процесс обобщает известные простейшие процессы и позволяет описать бесконечное множество иных процессов, каждому из которых соответствует значение показателя политропы из диапазона  $-\infty < n < +\infty$ . Например, задав  $1 < n < k$ , получим процесс 1-2, лежащий между изотермой и адиабатой. Он соответствует сжатию газа с отводом теплоты (давление увеличивается, энтропия уменьшается).

По графическому изображению частного политропного процесса на  $P$ - $v$  и  $T$ - $S$  диаграммах легко качественно проанализировать характер энергетических эффектов, реализующихся в процессе. Для этого нужно обратиться к соотношениям  $\delta \ell = P dv$ ,  $\delta \ell_{\text{нб}} = -v dP$ ,  $\delta q = T ds$ ,  $du = c_v dT$ ,  $di = c_p dT$ . Из них следует, что знаки энергетических характеристик процесса определяются знаками соответствующих дифференциалов в правой части приведенных соотношений. Например, в процессе 1-2 на рис. 4.1 деформационная работа ( $dv < 0; \delta \ell < 0$ ) и полезная внешняя работа ( $dP > 0; \delta \ell_{\text{нб}} < 0$ ) отрицательны, теплота в процессе отводится от газа ( $ds < 0; \delta q < 0$ ), внутренняя энергия и энтальпия увеличиваются ( $dT > 0; du > 0; di > 0$ ).

#### 4.1.4. Определение показателя политропы по результатам опытного исследования процесса

Если имеются опытные данные об изменении в ходе процессов двух параметров (например  $P$  и  $v$ ), то, построив зависимость между логарифмами величин этих параметров, можно оценить,

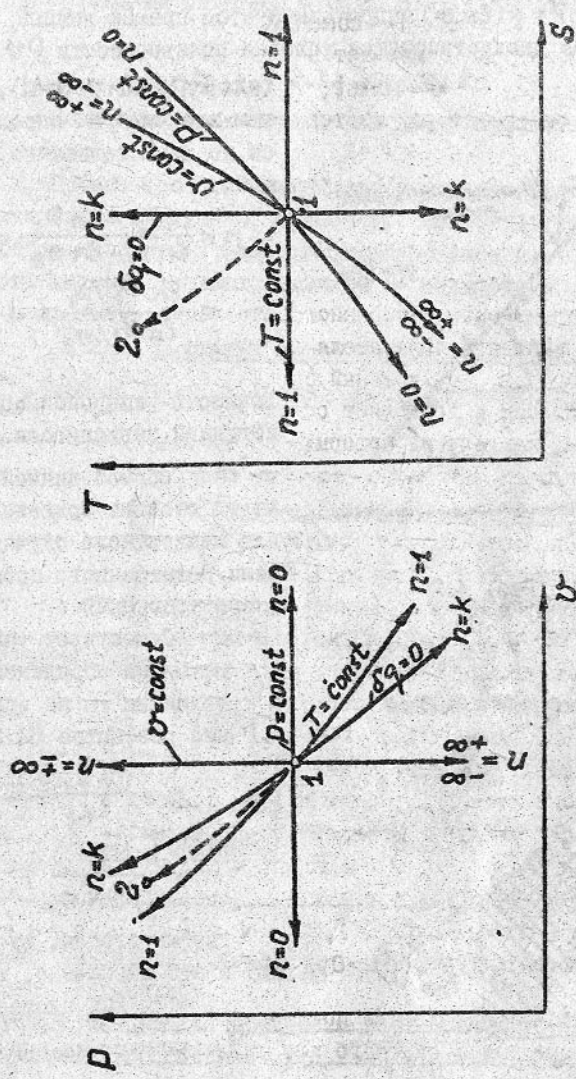


Рис. 4.1



в какой мере исследуемый процесс приближается к политропному и какой следует принять величину  $n$ . Действительно, если зависимость  $\ln P = f(\ln v)$  аппроксимируется прямой линией (рис. 4.2), то удовлетворяется условие политропности  $Pv^n = \text{const}$

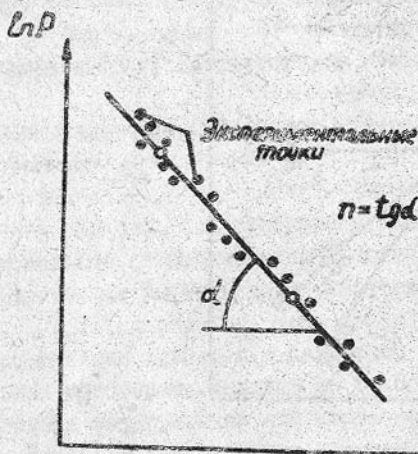


Рис. 4.2

(или  $\ln P + n \ln v = \text{const}$ ), причем величина  $n$  определяется по двум точкам на прямой:

$$n = \frac{\ln P_2 - \ln P_1}{\ln v_2 - \ln v_1} = \frac{\ln P_2/P_1}{\ln v_2/v_1} \quad (4.27)$$

Точность аппроксимации истинной зависимости  $\ln P$  от  $\ln v$  прямой линией отражает степень пригодности для конкретного случая модели политропного процесса и его уравнений.

Существует также методика определения величины  $n$  на основании равенства (4.23):

$$n = \frac{\ln v_{1-2}}{l_{1-2}} = \frac{\int_1^2 v dP}{\int_1^2 P dv} \quad (4.28)$$

где интегралы, входящие в это выражение, вычисляются как площади, показанные на рис. 4.3.

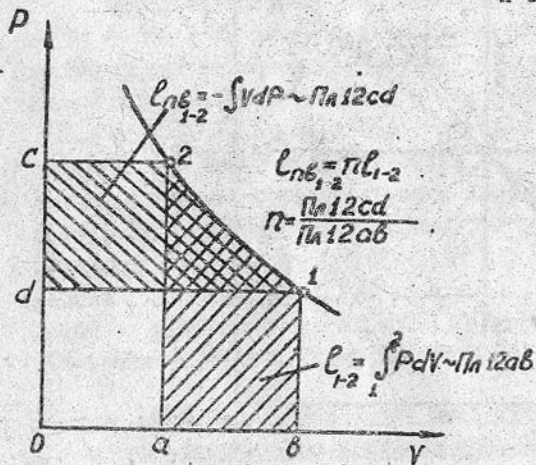


Рис. 4.3

## 4.2. Лабораторная работа № 6 АНАЛИЗ ПРОЦЕССА СЖАТИЯ ВОЗДУХА В ЦИЛИНДРЕ ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ

### 4.2.1. Задание

1. Получить индикаторную диаграмму процесса сжатия воздуха в дизеле.

2. Приняв процесс сжатия политропным, определить величину показателя политропы, вычислить температуру в конце процесса, деформационную и полезную внешнюю работы, теплоемкость и теплоту данного процесса, изменение внутренней энергии и энтальпии в процессе.

### 4.2.2. Описание экспериментальной установки

Установка (рис. 4.4) состоит из одноцилиндрового четырех-

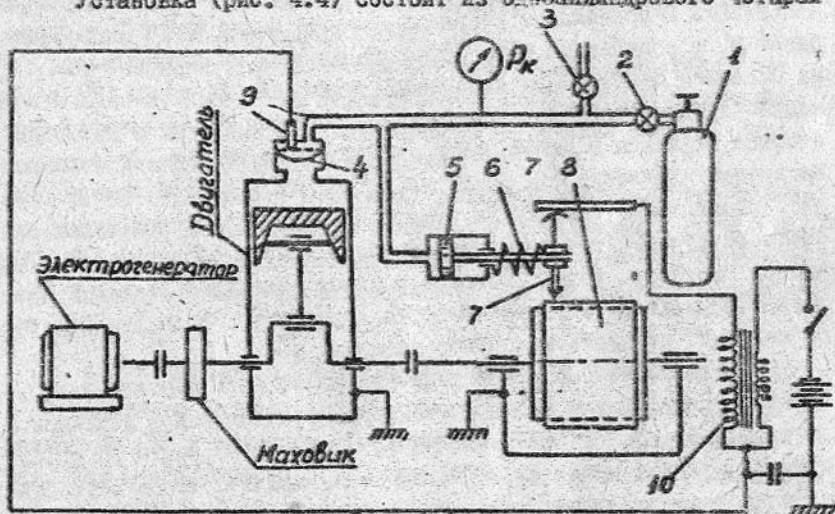


Рис. 4.4

тактного двигателя (дизеля), электрогенератора и электропневматического индикатора.

При исследовании процессов с отключенной подачей топлива электрогенератор работает в режиме электродвигателя как привод коленчатого вала дизеля. Индикатор предназначен для записи давления в цилиндре двигателя как функции поворота коленчатого

вала на установленном режиме работы двигателя. Запись давления осуществляется следующим образом.

Воздух из баллона I под командным давлением  $P_k$ , которое можно изменять при помощи кранов 2 и 3, подводится в полость над мембраной 4 и к поршню штока 5. На шток с другой стороны действует пружина 6; положение штока и закрепленной на нем иглы разрядника 7 определяется давлением  $P_k$ . При изменении  $P_k$  игла перемещается вдоль образующей барабана 8, связанного через муфту с валом двигателя. Между иглой разрядника и барабаном имеется зазор.

Полость под мембраной 4 соединяется с цилиндром двигателя. Как только давление в цилиндре двигателя становится равным давлению  $P_k$ , мембрана прижимается к электроду 9, замыкая сигнальную цепь индикатора. При этом в катушке 10 вырабатывается высокое напряжения и происходит разряд в зазоре между иглой 7 и барабаном 8, в результате чего остается отметка на закрепленной на барабане бумаге. При неизменном командном давлении  $P_k$  в каждом цикле установившейся работы двигателя будет оставаться отметка от искры в одной и той же точке на бумаге. Переход на другое давление  $P_k$  приведет к разряду в другой момент цикла, оставляющему отметку на бумаге при ином положении иглы и соответствующем угле поворота барабана. Таким образом, для записи множества точек, которое отражает зависимость между давлением в цилиндре и углом поворота коленчатого вала, необходимо медленно изменять командное давление  $P_k$ .

Электрическая система индикатора может быть переключена на непрерывный режим работы независимо от давления в цилиндре двигателя (режим "Автоматическая работа"). Этот режим используется для изображения координатных осей, вдоль которых осуществляется отсчет смещения иглы разрядника и углов поворота коленчатого вала.

#### 4.2.3. Порядок проведения эксперимента

1. Закрепить бумагу на барабане индикатора и нанести на нее координатные оси.
2. Для нанесения оси давления надо, вращая коленчатый вал вручную, установить метку "180°" его маховика против

отрелки, находящейся на корпусе двигателя, что соответствует положению поршня в верхней мертвой точке (ВМТ). Затем, включив электропитание индикатора и установив тумблер в положение "Автоматическая работа", медленно увеличивать давление  $P_k$  (открывая кран 2 при закрытом кране 3). Непрерывное повышение позволяет получить вдоль образующей барабана линию, соответствующую положению ВМТ.

3. Закрыть кран 2, открыть кран 3, установив командное давление равным атмосферному.

4. Для нанесения оси углов поворота коленчатого вала включить электродвигатель и вновь установить режим индикатора "Автоматическая работа". При этом по окружности барабана будет нанесена линия, соответствующая атмосферному давлению. Выключить режим "Автоматическая работа".

5. Установить заданную скорость вращения двигателя. Закрыть кран 3. Поставить переключатель индикатора в положение "Приемник". Медленно открывая кран 2 (в течение 0,5...1 мин), записать диаграмму процесса сжатия.

6. По образцовому манометру измерить максимальное значение давления, достигнутое в цилиндре при нахождении поршня в ВМТ. Выключить индикатор и двигатель, снять бумагу с барабана.

7. Записать атмосферное давление  $P_0$  и температуру окружающей среды  $t_0$ .

#### 4.2.4. Методика обработки результатов эксперимента

Используя полученную диаграмму, стоят зависимость между давлением  $P$  в цилиндре и объемом цилиндра  $V$  в такте сжатия. Для этого, выбрав 5...7 произвольных точек на индикаторной диаграмме, необходимо найти соответствующие им значения  $P$  и  $V$ . Для данного двигателя существует табличная зависимость между углом поворота коленчатого вала  $\alpha$  и объемом цилиндра:

$\alpha$ , град	0	20	40	60	90	120	140	160	180
$V \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup>	2,445	2,378	2,175	1,868	1,230	0,712	0,405	0,202	0,135

Здесь  $\alpha = 180^\circ$  соответствует окончанию процесса сжатия, т.е. положению ВМГ. Промежуточные значения объема могут быть найдены из графического представления функции  $V = V(\alpha)$ . Масштаб оси углов поворота индикаторной диаграммы: в 1 мм - 1 градус угла поворота коленчатого вала.

Давление  $P$  вычисляют по формуле

$$P = P_0 + f \cdot h,$$

где  $f$  - коэффициент жесткости пружины индикатора, определяемый в каждом конкретном опыте из соотношения

$$f = \frac{P_{\max \text{ изб}}}{h_{\max}},$$

где  $h$  - расстояние рассматриваемой точки диаграммы от оси углов поворота, мм.

Можно принять, что при перемещении поршня от положения, когда закрываются впускные окна ( $\alpha = 15^\circ$ ), к ВМГ ( $\alpha = 180^\circ$ ) происходит процесс сжатия неизменной массы воздуха. В таком случае зависимость  $P$  от  $V$  является (в определенном масштабе) зависимостью  $P$  от удельного объема  $V$ . Предположив на этом участке процесс сжатия политропным (что обычно делается при расчетах цикла двигателя), находят значение показателя политропы одним из методов, изложенных в подразд. 4.1. Приняв температуру в начале процесса сжатия  $T_1 = t_0 + 273 \text{ K}$ , используя уравнение связи параметров в политропном процессе и соответствующие соотношения для энергетических характеристик процесса, определяют оговоренные в задании величины.

При расчетах следует принять  $K = 1,4$ ,  $R = 287$ , Дж/(кг·К),  $C_v = 713$  Дж/(кг·К). Расположение полученного политропного процесса относительно основных частных термодинамических процессов (изохорного, изобарного, изотермического, адиабатного) изображают схематично.

#### 4.3. Лабораторная работа № 7 ПОДВОД ТЕПЛОТЫ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

##### 4.3.1. Задание

1. Произвести замеры температур и давлений на входе и выходе из камеры сгорания ГТД, а также измерения, позволяющие определить расходы воздуха и топлива через камеру сгорания.

2. Найти показатель полноты процесса подвода теплоты в камере сгорания.
3. Определить теплоту, подведенную в камеру сгорания к воздуху, и коэффициент полноты сгорания топлива.
4. Оценить возможность представления процесса как изобарного.

#### 4.3.2. Описание экспериментальной установки

Установка (рис. 4.5) состоит из камеры сгорания I, воздухоподводящих магистралей 2 и 3, выпускной трубы 4, манометров и перепадометров, указателя температуры 5, зонда 6 с термопарой для измерения температуры выходящего из камеры сгорания газа, объемного расходомера 7, трехходового топливного крана 8, топливного насоса 9.

Камера сгорания I устроена так, что в зону горения направляется лишь часть воздуха (первичный воздух). Этим создаются условия для устойчивого процесса горения горючего (керосина). Остальная часть воздуха (вторичный воздух) подводится к факелу через жалюзийные отверстия в жаровой трубе. Это обеспечивает снижение температуры на выходе из камеры сгорания до допустимых значений. На данной установке подвод первичного и вторичного расходов воздуха в камеру сгорания осуществляется через самостоятельные магистрали 2 и 3 от стационарного компрессора. В этих магистралях установлены устройства для измерения расходов воздуха. В магистраль первичного воздуха встроена трубка Вентури, а вторичного — дроссельная шайба. В этих устройствах происходит местное ускорение потока. Возникающий при сужении потока перепад давления и избыточное давление воздуха в этих магистралях непосредственно перед сужением измеряются при помощи датчиков перепада давления и вторичных приборов (цифровые вольтметр и омметр).

Указатель температуры служит для приближенной оценки температуры  $t_2$  на выходе из камеры сгорания. Он используется для оперативного контроля режима работы установки при запуске камеры сгорания.

Поле температур за камерой сгорания неравномерно. Изме-



рение распределения температур по поперечному сечению выходной трубы осуществляется с помощью подвижного зонда 6 со встроенной в него хромель-копелевой термопарой. ЭДС термопары зонда измеряется цифровым милливольтметром. Топливный расходомер 7 представляет собой сосуд с мерной трубкой. Расход топлива из сосуда при перемещении уровня жидкости от верхней до нижней метки на мерной трубке равен 1 кг. Для определения секундного расхода следует найти время выработки 1 кг топлива. Трехходовой кран 8 имеет три разных положения:

- а) топливо поступает из топливного бака к насосу 9 и далее в камеру сгорания, минуя расходомер;
- б) топливо поступает к насосу и одновременно в мерный сосуд расходомера;
- в) топливо к насосу поступает из расходомера.

На установке имеется также термометр для измерения температуры воздуха перед камерой сгорания  $t_{вх}$  и U-образный манометр, заполненный водой, для определения избыточного давления перед и за камерой сгорания.

### 1.3.3. Порядок проведения эксперимента

1. На установленном режиме работы камеры сгорания установить зонд 6 в положение, при котором измеряется средняя по сечению температура потока за камерой сгорания. Это положение обозначено меткой на координатнике зонда.

2. Измерить следующие параметры:

- параметры атмосферы  $P_0, t_0$ ;
- ЭДС термопары зонда 6  $E_{тп}$ ;
- температуру и избыточное давление воздуха перед камерой сгорания  $t_{вх}, P_{изб}$ ;
- избыточное давление за камерой сгорания  $P_{изб}$ ;
- показания датчика давления воздуха перед дроссельной шайбой и перепада давления на дроссельной шайбе (напряжение в вольтах  $V$  и  $V_{дш}$ );
- показания датчика давления воздуха перед трубкой Вентури и перепада давления на трубке Вентури (сопротивления в килоомах  $R$  и  $R_{дв}$ );



- время выработки 1 кг керосина, с.

#### 4.3.4. Методика обработки результатов эксперимента

Температуру в начале процесса подвода теплоты можно принять равной температуре воздуха перед камерой сгорания,  $C^{\circ}$ :

$$T_1 = T_{\text{вк}} = 273 + t_0 \quad (4.29)$$

Температуру  $T_2$  в конце исследуемого процесса определяют по показаниям термометра зонда 6 с использованием следующей аппроксимации тарировочной характеристики термометра:

$$T_2 = 25 E_{\text{тп}} + t_0 + 273. \quad (4.30)$$

Находят абсолютные давления и удельные объемы газа перед и за камерой сгорания. По соотношениям, приведенным в подразд. 4.1, определяют показатель политропы процесса подвода теплоты и удельную теплоту, подведенную к воздуху.

Газовую постоянную принимают равной  $R = 287, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ , показатель адиабаты  $k = 1,4$ .

Конкретизация показателя политропы позволяет определить и другие представляющие интерес при анализе процесса величины: удельную деформационную и полезную внешнюю работы; изменение энтальпии, внутренней энергии, энтропии. В данной работе их следует рассчитать.

Результаты термодинамических расчетов могут быть использованы для различных целей. В частности, оценивают коэффициент полноты сгорания топлива в камере:

$$\eta_{\text{КС}} = \frac{q_{1-2} \cdot G}{H_{\text{н}} \cdot G_{\text{т}}}, \quad (4.31)$$

где  $H_{\text{н}} = 4290$  - тепло, выделяемое при полном сгорании керосина, кДж/кг;  $G = 1/\tau$  - секундный расход топлива;  $G = G_{\text{вк}} + G_{\text{вг}}$  - секундный расход воздуха через установку;  $G_{\text{вк}}$  и  $G_{\text{вг}}$  - расходы первичного и вторичного воздуха. Величины  $G_{\text{вк}}$  и  $G_{\text{вг}}$  находят по результатам замеров на трубке Вентури и мерной шайбе:

$$G_{\text{вк}} = \varphi_{\text{в}} f_{\text{в}} \sqrt{2 \rho_{\text{в}} \Delta P_{\text{в}}}. \quad (4.32)$$

$$G_{гг} = \Psi_{ш} f_{ш} \sqrt{2\rho_{ш} \Delta P_{ш}}, \quad (4.33)$$

где  $\Psi_B = 0,98$ ;  $\Psi_{ш} = 0,65$  - коэффициенты расхода данных устройств;  $f_B = 12,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ;  $f_{ш} = 17,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$  - проходные площади трубки Вентури и дроссельной шайбы.

Перепад давления, устанавливающийся в трубке Вентури и дроссельной шайбе, вычисляют по следующим зависимостям. На:

$$\Delta P_B = (0,1721 \cdot R_{\Delta B} - 0,1601) \cdot 0,981 \cdot 10^5,$$

$$\Delta P_{ш} = (0,05224 \cdot V_{\Delta ш} - 0,02366) \cdot 0,981 \cdot 10^5.$$

Избыточное давление в магистралях подачи первичного и вторичного воздуха в камеру сгорания находят следующим образом:

$$P_{B \text{ изб}} = (0,1721 \cdot R_B - 0,1601) \cdot 0,981 \cdot 10^5,$$

$$P_{ш \text{ изб}} = (0,05224 \cdot V_{ш} - 0,02366) \cdot 0,981 \cdot 10^5.$$

Плотности воздуха перед трубкой Вентури и мерной шайбой определяют с использованием термического уравнения состояния идеального газа.

Процесс подвода теплоты в камерах сгорания ГТД в приближенных термодинамических расчетах считают изобарным. Рассчитывают удельную теплоту процесса, сопоставляют с теплотой политропного процесса, а затем оценивают правомерность допущения об изобарности процесса.

#### 4.4. Лабораторная работа № 8

##### РАСШИРЕНИЕ ВОЗДУХА В СОСУДЕ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ИЗ НЕГО

##### 4.4.1. Сущность изучаемого процесса

При вытекании газа, находящегося в сосуде при начальном давлении  $P_1$ , оставшаяся масса газа охлаждается в результате совершения работы расширения и воспринимает энергию в форме теплоты от стенок сосуда. Если в момент, когда давление в сосуде снизится до значения  $P_0$ , перекрыть выходное отверстие, то через некоторое время вследствие теплообмена температура газа в сосуде восстановится, а давление поднимется до значения  $P_2$ . Это следует учитывать при анализе работы различных пневматических устройств.

4.4.2. Задача

1. Измерить давления  $P_1$  и  $P_2$  при протекании описанного процесса на установке.

2. Определить изменение других параметров состояния, количество вытекшего воздуха, подводенную к воздуху теплоту, деформационную и полезную внешнюю работы газа.

4.4.2. Описание экспериментальной установки

Сосуд 1 может заполняться сжатым воздухом от мембранного микрокомпрессора 2 (рис. 4.6).

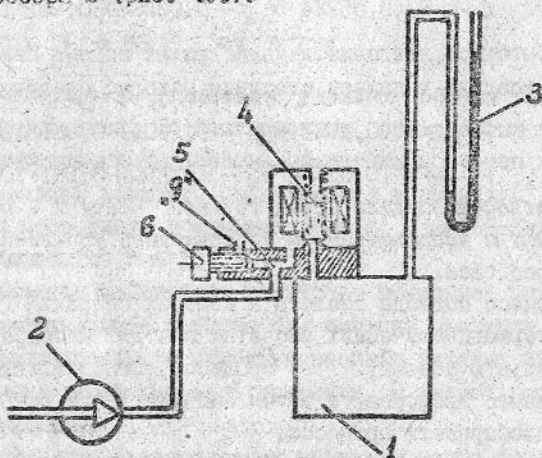


Рис. 4.6

Давление в сосуде регистрируется U-образным жидкостным манометром 3, заполненным водой.

Соединение сосуда с микрокомпрессором или атмосферой осуществляется быстродействующим электропневмоклапаном 4. При выключении электропитания клапана он перекрывает вход в сосуд. Если перепускной винт 6 открыт, канал 5 при включении электропневмоклапана соединяется с атмосферой через дросселирующее отверстие "а". На протекание процессов расширения и теплообмена в сосуде можно влиять гидросопротивлением на выходе (т.е. размером отверстия "б").

#### 4.4.3. Порядок проведения эксперимента

1. Затянуть винт 6. Включить микрокомпрессор 2 и закрыть клапан 4. Следить за повышением давления в сосуде.

2. При приближении уровня жидкости к краю трубок манометра (т.е. при повышении избыточного давления в сосуде  $P_{1изб}$  до 600 мм.вод.ст.) выключить питание клапана и микрокомпрессора. Выждать момент установления  $P_{1изб}$  (вначале  $P_{1изб}$  изменяется в результате теплообмена воздуха со стенками сосуда) и измерить величину установившегося  $P_{1изб}$ . Отвинтить винт 6 и, открыв клапан 4, наблюдать за падением давления. В момент выравнивания давления внутри сосуда с атмосферным клапан 4 закрыть. Наблюдая далее за манометром 3, измерить установившееся через некоторое время давление  $P_{2изб}$ . Опыт провести 3...4 раза и усреднить результаты измерений.

3. Измерить атмосферное давление  $P_0$  и температуру в помещении  $t_0$ .

#### 4.4.4. Методика обработки результатов эксперимента

Для усредненных измеренных параметров определяют абсолютное давление и температуру воздуха в сосуде в начальном "1" и конечном "2" состояниях воздуха:

$$P_1 = P_{1изб} + P_0; \quad P_2 = P_{2изб} + P_0; \quad T_1 = T_2 = t_0 + 273.$$

Зная эти параметры, необходимо найти изменение других параметров и функций состояния:  $\Delta v, \Delta u, \Delta s, \Delta i$ . Для расчета принимают  $C_p = 1$  кДж/(кг·К);  $R = 287$  Дж/кг. Определяют также относительное уменьшение массы воздуха в сосуде:

$$\Delta \bar{M} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} = \frac{P_1 - P_2}{P_1}. \quad (4.34)$$

Теплота и работа процесса зависят не только от начального и конечного состояний, но и от характера его протекания. Данный процесс можно представить как результат двух политропных процессов (рис. 4.7): процесса 1-а (от момента открытия до момента закрытия клапана) и изохорного процесса а-2.

Для процесса 1-а применима зависимость (4.17, а):

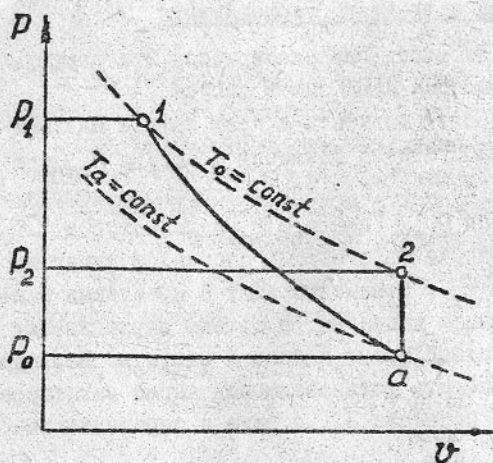


Рис. 4.7

$$\frac{T_1}{T_a} = \left(\frac{P_1}{P_a}\right)^{\frac{n-1}{n}} = \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{\frac{n-1}{n}}$$

Для изохорного процесса а-2 справедливо соотношение

$$\frac{T_1}{T_a} = \frac{P_2}{P_a} = \frac{P_2}{P_0} \quad \text{или}$$

$$\frac{T_0}{T_a} = \frac{P_2}{P_0}, \quad \text{так как}$$

$T_2 = T_1 = T_0$ . Из этих равенств находят показатель

политропы процесса 1-а :

$$n = \left(1 - \frac{\ln \frac{P_2}{P_a}}{\ln \frac{P_1}{P_a}}\right)^{-1} = \frac{\ln P_1/P_0}{\ln P_1/P_2} \quad (4.35)$$

Используя выражения, приведенные в подразд. 4.1, определяют теплоту, деформационную и полезную внешнюю работы процесса 1-а-2. Процесс 1-а-2 изображает на T-S диаграмме.

#### 4.5. Контрольные вопросы

1. Какие допущения принимаются при исследовании политропных термодинамических процессов?
2. Назвать признаки политропного процесса идеального газа. Получить соотношения (4.16) и (4.17).
3. Объяснить смысл процессов, в которых  $C_n \rightarrow +\infty$ ,  $C_n \rightarrow -\infty$ .
4. Подводится или отводится теплота в политропном процессе сжатия при  $n > k$ ? Привести пример такого процесса.
5. Как изменяется внутренняя энергия газа и каков знак теплоты в политропном процессе расширения при  $1 < n < k$ ?
6. Как изменяется плотность газа в политропном процессе с подводом теплоты при  $n > k$ ?
7. Как находится показатель политропы по результатам

опытного исследования процесса?

8. Изобразить качественный вид графика зависимости теплоемкости политропного процесса от показателя политропы.

9. Проанализировать качественно энергетические характеристики политропного процесса повышения давления в газе с показателем политропы  $n = -1$ . Объяснить физический смысл полученных результатов.

10. Определить деформационную и полезную внешнюю работы изотермического процесса.

11. Является ли процесс 1-а-2 на рис. 4.7 политропным?

12. Изобразить на  $P-U$  и  $T-S$  диаграммах области, в которых располагаются политропные процессы, протекающие:

- с подводом и отводом теплоты;
- с увеличением и уменьшением внутренней энергии;
- с положительной и отрицательной деформационной работой.

## 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕМЕНТАХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

Реальные процессы в энергоустановках являются необратимыми. Их расчет, основанный на допущении об их обратимости, можно скорректировать путем введения поправочных коэффициентов, полученных при экспериментальном исследовании соответствующих процессов. В данном разделе описаны лабораторные работы, связанные с определением коэффициента полноты сгорания топлива в камере сгорания, адиабатного КПД компрессора, внутреннего КПД турбины.

### 5.1. Лабораторная работа № 9

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛНОТЫ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

##### 5.1.1. Задание

Оценить величину коэффициента полноты сгорания топлива в камере сгорания на основе двух подходов:

- методом химического анализа продуктов сгорания;

б) методом теплового баланса.

### 5.1.2. Описание экспериментальной установки и измеряемые величины

В данной работе используется экспериментальная установка, изображенная на рис. 1.4 и описанная в подразд. 2.2, к которому следует обратиться при выполнении этого эксперимента.

Для решения поставленной задачи необходимо измерить:

1. Массовый расход воды через систему охлаждения камеры сгорания  $G_{ж}$ , кг/с. Измеряется с помощью турбинного датчика расхода с частотомером в качестве вторичного прибора IO (см. рис. 1.4). Расход  $G_{ж}$  при этом находится из следующего выражения, описывающего тарировочную характеристику расходомера:

$$G_{ж} = (0,0004623 + 0,0003275f), \quad (5.1)$$

где  $f$  - частота выходного сигнала датчика, Гц.

$\rho_{ж} = 999$  - плотность воды, кг/м<sup>3</sup>.

2. Массовый расход топлива  $G_T$  (кг/с). Определяется весовым методом с помощью весов 6, на которых установлен сосуд 5 с керосином.

При работе камеры сгорания выработка керосина производится из этого сосуда. Для измерения расхода необходимо измерить время  $\tau$ , с, выработки выбранной массы топлива  $M_T$ , кг, и вычислить его массовый расход:

$$G_T = M_T / \tau. \quad (5.2)$$

3. Температуры воды на входе  $T_{ж1}$  и выходе  $T_{ж2}$  системы охлаждения камеры сгорания и продуктов сгорания в выхлопной трубе. Измеряются хромель-копелевыми термопарами 7, 8, 9, фиксируя их ЭДС ( $E_1, E_2, E_3$ ) с помощью цифрового милливольтметра II. Холодный спай термопар находится при температуре окружающей среды. Тарировочная характеристика термопар приведена в прил. I.

4. Состав продуктов сгорания керосина в воздухе. Объемные доли компонентов в продуктах сгорания измеряются с помощью химического газоанализатора по методике, описанной в подразд.

## 2.2.

5. Массовый расход воздуха через камеру сгорания. Определяется с помощью мерного сопла 12, установленного в трубопроводе на входе в нагнетатель 3.

Для этого измеряют с помощью микроманометра 14 перепад давления на мерном сопле 12, Па:

$$\Delta P = 9,81 K h,$$

где  $h$  - длина столба жидкости, отсчитанная по наклонной шкале манометра, мм;  $K$  - фактор наклонного манометра, учитывающий плотность рабочей жидкости, угол наклона трубки и отношение диаметров наклонной трубки и чашки (значение фактора  $K$  указано на приборе).

Массовый расход воздуха  $G$ , кг/с, вычисляется по соотношению

$$G_g = \alpha f \sqrt{2 \rho_0 \Delta P}, \quad (5.3)$$

где  $\alpha = 0,985$  - коэффициент расхода данного мерного сопла (определен экспериментально);  $f$  - площадь сечения горла мерного сопла (диаметр горла  $d = 0,04$  м);  $\rho_0$  - плотность воздуха на входе в сопло, которая находится по термическому уравнению состояния при параметрах атмосферы  $P_0, T_0$ .

### 5.1.3. Порядок проведения эксперимента и методика обработки его результатов

1. После запуска камеры сгорания и выхода ее на стационарный режим работы измерить  $P_0, T_0, h, M_T, \tau, E_1, E_2, E_3$ , а также объемные доли компонентов продуктов сгорания (диоксида углерода, оксида углерода, кислорода, азота, паров воды) -  $Z_{CO_2}, Z_{CO}, Z_{O_2}, Z_{H_2O}, Z_{N_2}$ .

1. Вычислить кажущуюся молекулярную массу продуктов сгорания (см. подразд. 2.1).

2. Определить коэффициент полноты сгорания топлива по результатам газового анализа.

Коэффициент полноты сгорания топлива в камере сгорания обычно определяют как отношение количества теплоты  $Q_1$ , фактичес-



ки выделившегося в единицу времени, к полному количеству теплоты  $Q_2$ , которая теоретически могла бы выделиться при полном сгорании топлива:

$$\eta_{\text{КС}} = \frac{Q_1}{Q_2} \quad (5.4)$$

Если предположить, что весь водород, содержащийся в углеводородном топливе типа  $C_xH_y$ , полностью прореагировал с образованием  $H_2O$ , а в анализируемой пробе продуктов сгорания пары воды полностью сконденсированы и все остальные компоненты являются идеальными газами, то можно вычислить ту часть расхода топлива  $G'_T$ , из которой образовались продукты реакции:

$$G'_T = G_{\text{ПС}} \frac{m_{\text{C(ПС)}}}{m_{\text{C(T)}}} \quad (5.5)$$

где  $G_{\text{ПС}}$  — массовый расход продуктов сгорания;  $m_{\text{C(ПС)}}$ ,  $m_{\text{C(T)}}$  — массовые доли углерода соответственно в продуктах сгорания и в топливе.

Очевидно, что теплота  $Q_1$ , выделявшаяся в камере сгорания — это результат сгорания именно этой  $G'_T$  части от общего расхода топлива  $G_T$ , и поэтому

$$Q_1 = G'_T H_H \quad (5.6)$$

где  $H_H = 42950$  — низшая теплотворная способность топлива, кДж/(кг топл.).

Для определения  $m_{\text{C(ПС)}}$  следует воспользоваться результатами газового анализа:

$$m_{\text{C(ПС)}} = m_{\text{CO}_2} \frac{\mu_{\text{C}}}{\mu_{\text{CO}_2}} + m_{\text{CO}} \frac{\mu_{\text{C}}}{\mu_{\text{CO}}} = m_{\text{CO}_2} \cdot \frac{12}{44} + m_{\text{CO}} \cdot \frac{12}{28} \quad (5.7)$$

где массовые доли компонентов  $m_{\text{CO}_2}$  и  $m_{\text{CO}}$  находятся по измеренным объемным долям:

$$m_i = \varphi_i \frac{\mu_i}{\mu_{\text{ПС}}} \quad (5.8)$$

Массовую долю углерода  $m_{\text{C(T)}}$  в топливе определяют по известному его составу  $C_{12}H_{24}$ :

$$m_{\text{C(T)}} = \frac{\mu_{\text{C}} \cdot 12}{\mu_{\text{C}} \cdot 12 + \mu_{\text{H}} \cdot 24} \quad (5.9)$$

Массовый расход продуктов сгорания состоит из расхода воздуха  $G_B$  и расхода топлива  $G_T'$ , образовавшего продукты сгорания:

$$G_{\text{пс}} = G_B + G_T' \quad (5.10)$$

Поэтому зависимость (5.5) можно представить в виде

$$G_T' = (G_B + G_T') \frac{m_{\text{с(пс)}}}{m_{\text{с(т)}}}, \quad (5.11)$$

откуда

$$G_T' = G_B \frac{1}{\frac{m_{\text{с(т)}}}{m_{\text{с(пс)}}} - 1} \quad (5.12)$$

Входящая в (5.6) величина  $H_{\text{и}}$  определена в опытах при полном окислении как водорода, так и углерода топлива. Поэтому при значительном содержании CO в продуктах сгорания следует внести поправку на величину теплового эффекта несостоявшейся реакции окисления CO в CO<sub>2</sub>. Для этого необходимо вычислить массовый расход CO в продуктах сгорания:

$$G_{\text{CO}} = G_{\text{пс}} m_{\text{CO(пс)}}, \quad (5.13)$$

а затем и уточненное значение действительно выделившейся теплоты:

$$Q_1 = G_T' H_{\text{и}} - G_{\text{пс}} m_{\text{CO(пс)}} Q_{\text{CO}}, \quad (5.14)$$

где  $Q_{\text{CO}} = 10100$  - тепловой эффект реакции окисления CO до CO<sub>2</sub>, кДж/кг.

Далее с учетом того, что  $Q_2 = G_T H_{\text{и}}$ , по формуле (5.5) определяют коэффициент полноты сгорания:

$$\eta_{\text{кс}} = \frac{G_T' H_{\text{и}} - G_{\text{пс}} m_{\text{CO(пс)}} \cdot Q_{\text{CO}}}{G_T H_{\text{и}}} \quad (5.15)$$

4. Определить коэффициент полноты сгорания топлива из условия теплового баланса камеры сгорания.

Нахождение коэффициента выделения теплоты по экспериментальному тепловому балансу, как и в методе газового анализа продуктов сгорания, сводится, по сути, к определению фактически выделившейся в камере сгорания теплоты  $Q_1$ . Точность определения  $Q_1$  зависит, во-первых, от возможности учета в опыте

всех ее составляющих и, во-вторых, от погрешностей измерения значений этих составляющих. В условиях проводимого эксперимента количество теплоты, фактически выделяющееся в камере сгорания в единицу времени, можно вычислить, по крайней мере, по трем ее составляющим:  $\Delta Q_{ж}$  - теплоте, затраченной на нагрев охлаждающей воды;  $\Delta Q_{пс}$  - теплоте, затраченной на нагрев продуктов сгорания;  $\Delta Q_0$  - теплоте, отведенной в окружающую среду через стенки камеры сгорания и кожуха охлаждения. Следовательно, на этом основании можно считать, что

$$Q_1 = \Delta Q_{ж} + \Delta Q_{пс} + \Delta Q_0$$

и в соответствии с (5.5)

$$\eta_{кс} = \frac{\Delta Q_{ж} + \Delta Q_{пс} + \Delta Q_0}{Q_2} \quad (5.16)$$

Значения  $\Delta Q_{ж}$  и  $\Delta Q_{пс}$  легко вычислить по имеющимся экспериментальным данным и формулам:

$$\Delta Q_{ж} = G_{ж} C_{ж} (T_{ж2} - T_{ж1}), \quad (5.17)$$

$$\Delta Q_{пс} = C_{р(пс)} (G_B + G_T) (T_2 - T_0), \quad (5.18)$$

где  $C_{ж}$  - удельная теплоемкость воды, кДж/(кг·К), в интервале температур ( $T_{ж1} \dots T_{ж2}$ ) (можно принять  $C_{ж} = 4,19$ );

$C_{р(пс)}$  - удельная изобарная теплоемкость продуктов сгорания в интервале температур ( $T_0 \dots T_2$ ) (см. прил. 2).

Точность определения составляющих теплоты зависит от точности измерений расходов воды и воздуха и их температур. Определение величин  $\Delta Q_0$  весьма затруднительно без постановки специальных экспериментов. Однако, учитывая, что разность температур кожуха системы охлаждения и окружающего воздуха сравнительно мала, этой составляющей в нашем случае можно пренебречь. Тогда с учетом принятого допущения и (5.16), (5.17), (5.18), коэффициент полноты сгорания можно определить по соотношению

$$\eta_{сг} = \frac{G_{ж} C_{ж} (T_{ж2} - T_{ж1}) + (G_B + G_T) (T_{пс} - T_0)}{G_T H_{и}} \quad (5.19)$$

Сопоставляют полученные разными методами коэффициенты  $\eta_{сг}$

и оценивают степень достоверности полученных результатов.

## 5.2. Лабораторная работа № 10 ТЕХНИЧЕСКАЯ РАБОТА ПОТОКА ГАЗА В ТУРБИНЕ

### 5.2.1. Общие положения

Газовая турбина представляет собой машину для производства технической работы потоком газа, которая расходуется потребителем работы (компрессором в авиадвигателях, электрогенератором в газотурбинных электростанциях и др.).

Основным элементом авиационной турбины является вращающийся ротор, в котором имеются криволинейные каналы, образованные профилированными лопатками. Силовое взаимодействие газового потока с лопатками обеспечивает получение технической работы на валу турбины.

Термодинамические соотношения позволяют связать параметры потока с технической работой, а при известном расходе газа — и с мощностью турбины.

Из аналитического выражения первого начала термодинамики для стационарного потока газа в системе отсчета, связанной с неподвижными стенками проточной части турбины, следует (см. подразд. 3.1.2)

$$\delta q = di^* + \delta e_{\text{техн}} + q dh. \quad (5.20)$$

При характерных для турбины значениях скоростей движения газа (порядка  $10^2$  м/с) его частицы столь быстро проходят через ее проточную часть, что сколь-нибудь существенный теплообмен со стенками канала не происходит. Поэтому с достаточным основанием можно принять допущение об адиабатичности процесса изменения параметров газа в турбине ( $\delta q = 0$ ).

Применительно к газовым машинам можно также пренебречь изменением потенциальной энергии потока газа. Тогда из (5.20) следует

$$\delta e_{\text{техн}} = -di^*,$$

$$e_{\text{т}} \approx e_{\text{техн}1-2} = i_1^* - i_2^*. \quad (5.21)$$

Здесь  $l_T$  — удельная относенная к 1 кг газа работа вала турбины, которая практически равна технической работе потока. Различие этих работ обусловлено в основном проявлением пренебрежимо малых потерь механической энергии (диссипацией) в подшипниках турбины. Индексами 1 и 2 относятся к параметрам перед и за турбиной, индекс \* обозначает параметры заторможенного потока (полные параметры). Таким образом, удельная техническая работа газа в турбине определяется убылью его полной энтальпии.

Если воспользоваться калогическим уравнением состояния, изменение энтальпии можно связать с изменением термических параметров состояния рабочего тела. В частности, для идеального газа  $di^* = c_p dT^*$ . Это соотношение хорошо подтверждается во всем диапазоне температур, характерных для авиационных двигателей. Кроме того, при незначительном изменении полной температуры газа в турбине можно принять  $c_p = \text{const}$  (в противном случае необходимо пользоваться средней теплоемкостью в интервале температур  $T_1^*, \dots, T_2^*$ ). Поэтому

$$l_T = c_p (T_1^* - T_2^*). \quad (5.22)$$

Соотношения (5.21) и (5.22) справедливы независимо от степени необратимости реальных процессов в турбине, как и исходное уравнение (5.20), из которого они получены (см. подразд. 3.1.2).

Для идеализированного обратимого адиабатного процесса (такой процесс по второму началу термодинамики является также изэнтропическим) справедливо соотношение (см. подразд. 4.1)

$$\frac{T_2^*}{T_1^*} = \left( \frac{p_2^*}{p_1^*} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}. \quad (5.23)$$

Тогда техническую работу изэнтропического потока газа в турбине можно представить в виде

$$l_{TS} = i_1^* - i_{2S}^* = c_p (T_1^* - T_{2S}^*) = \frac{\kappa}{\kappa-1} R T_1^* \left[ 1 - \left( \frac{p_2^*}{p_1^*} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]. \quad (5.24)$$

Здесь индекс "S" обозначает величины, реализующиеся в изэнтропическом процессе изменения состояния газа в турбине.

В реальных турбинах в силу необратимости процесса, обуслов-

ленной диссипативными эффектами, фактическая работа турбины меньше изэнтропической, т.е.  $\ell_T < \ell_{TS}$ . Это можно наглядно показать на  $i-s$  диаграмме, используя второе начало термодинамики (выполнить самостоятельно).

Степень необратимости реальных процессов отражают значения внутреннего КПД турбины  $\eta_{вн}$ :

$$\eta_{вн} = \frac{\ell_T}{\ell_{TS}} \quad (5.25)$$

Тогда реальную удельную техническую работу потока газа в турбине можно определить через внутренний КПД:

$$\ell_T = \eta_{вн} \cdot \ell_{TS} \quad (5.26)$$

Мощность турбины можно найти, пользуясь следующим выражением:

$$N_T = G_T \ell_T, \quad (5.27)$$

где  $G_T$  - массовый расход газа через турбину.

Из сказанного ясно, что важной задачей является определение внутреннего КПД турбины. Она решается главным образом экспериментальными методами, что и предполагается осуществить в данной лабораторной работе. Эта работа выполняется на завершающем этапе изучения курса "Термодинамика", когда студенты уже в состоянии самостоятельно разработать методику экспериментального исследования, пользуясь предоставленной в их распоряжение лабораторной установкой.

### 5.2.2. Задание

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой и измеряемыми на ней параметрами.

2. Исходя из возможностей установки, разработать методику экспериментального исследования для определения внутреннего КПД турбины и конкретизировать измеряемые параметры.

3. Экспериментально определить внутренний КПД турбины при различных режимах ее работы по давлению  $P_{T1}^*$  перед турбиной.

4. Для одного из исследованных режимов изобразить процесс расширения газа в турбине на  $P-v$ ,  $T-s$ ,  $i-s$  диаграммах.

### 5.2.3. Описание экспериментальной установки, порядок проведения эксперимента и методика обработки его результатов

Экспериментальная установка описана в подразд. 3.4.2. Объектом эксперимента является турбина, установленная в турбохолодильнике самолетной системы кондиционирования воздуха. Потребителем мощности турбины является компрессор. Установка позволяет измерять параметры газа перед и за турбиной и компрессором, а также массовые расходы воздуха через эти агрегаты.

Турбохолодильник выводится на стационарный режим работы согласно описанию подразд. 3.4.3. Затем, варьируя давление  $P_{т1}$  перед турбиной в указанных в этом разделе пределах, производятся необходимые для решения поставленной задачи измерения.

Зависимости внутреннего КПД турбины от давления газа перед ней и массового расхода газа конкретизируются и представляются в форме графиков.

## 5.3. Лабораторная работа № 11 ТЕХНИЧЕСКАЯ РАБОТА ПОТОКА ГАЗА В КОМПРЕССОРЕ

### 5.3.1. Общие положения

Компрессоры предназначены для повышения давления газа в результате потребления потоком работы от внешних источников механической энергии.

Независимо от конструкции компрессора (лопаточный, поршневой и др.) техническая работа газа в его проточной части может быть найдена с помощью общих термодинамических соотношений, вытекающих из первого и второго начал термодинамики.

Так же, как и при исследовании рабочего процесса в турбине, для анализа процессов в компрессоре целесообразно воспользоваться первым началом термодинамики в форме (5.20) при аналогичных допущениях. Тогда выражение удельной технической работы потока газа в компрессоре представимо в виде

$$l_{\text{техн}1-2} = i_1^* - i_2^* = c_p (T_1^* - T_2^*) \quad [\text{см. (5.22)}]$$

где индексы 1 и 2 соответствуют параметрам перед и за компрессором.

Так как в компрессоре совершается работа над газом, значение  $\ell_{\text{тех}}$  отрицательно. Обычно в технических расчетах вводят понятие о работе привода компрессора  $\ell_{\kappa}$ , понимая под ней работу, подводимую к его валу. Очевидно, что эта работа обратна по знаку технической работе потока газа в компрессоре, т.е. положительна:

$$\ell_{\kappa} = -\ell_{\text{тех}1-2} = i_2^* - i_1^* = c_p(T_2^* - T_1^*). \quad (5.28)$$

Таким образом, удельную работу привода компрессора в адиабатном процессе сжатия газа можно определить при оговоренных в подразд. 5.2.1 допущениях приращением полной удельной энтальпии потока.

Выражение (5.28) характеризует реальную работу привода компрессора независимо от степени необратимости реализующегося в нем адиабатного процесса. Если процесс сжатия газа идеализировать и считать обратимым (а поскольку он адиабатный, то и изэнтропическим), изменение температуры газа в компрессоре можно связать с изменением давления следующим образом:

$$\frac{T_2^*}{T_1^*} = \left( \frac{p_2^*}{p_1^*} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \pi_{\kappa}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}, \quad (5.29)$$

где  $\pi_{\kappa}$  - степень повышения полного давления газа в компрессоре. Индекс "s" обозначает параметры в изэнтропическом процессе.

Воспользовавшись выражением (5.29) и учитывая (5.28), удельную работу привода компрессора в изэнтропическом процессе можно выразить следующим образом:

$$\ell_{\kappa s} = c_p T_1^* \left[ \left( \frac{p_2^*}{p_1^*} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] = \frac{\kappa}{\kappa-1} R T_1^* (\pi_{\kappa}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1). \quad (5.30)$$

В реальном адиабатном процессе сжатия газа для обеспечения заданной степени повышения полного давления работа привода компрессора  $\ell_{\kappa}$  больше изэнтропической  $\ell_{\kappa s}$  из-за проявления диссипативных эффектов. Это следует из второго начала термодинамики (показать самостоятельно, изобразив процесс сжатия газа



в изэнтропическом и реальном процессе на  $i-s$  диаграмме).

Таким образом,  $\ell_k > \ell_{ks}$ . Отношение  $\ell_{ks}/\ell_k$  называют адиабатным КПД компрессора

$$\eta_{ад} = \frac{\ell_{ks}}{\ell_k}, \quad (5.31)$$

и тогда

$$\ell_k = \frac{\ell_{ks}}{\eta_{ад}}. \quad (5.32)$$

Мощность привода компрессора определяется следующим образом:

$$N_k = G_k \ell_k, \quad (5.33)$$

где  $G_k$  — массовый расход газа через компрессор.

Если известно значение  $\eta_{ад}$ , то, пользуясь термодинамическими соотношениями для обратимых процессов, легко найти реальные значения удельной работы и мощности привода компрессора, обеспечивающего необходимую степень повышения полного давления и массовый расход газа.

В данной лабораторной работе ставится задача определить адиабатный КПД компрессора на основе экспериментального исследования.

### 5.3.2. Задание

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой и измеряемыми на ней параметрами.
2. Исходя из возможностей установки, разработать методику экспериментального исследования для определения адиабатного КПД компрессора и конкретизировать измеряемые параметры.
3. Экспериментально определить адиабатный КПД компрессора при различных режимах его работы при реализованной степени повышения полного давления.
4. Для одного из исследованных режимов изобразить процесс сжатия газа в компрессоре на  $P-v$ ,  $T-s$ ,  $i-s$  диаграммах.

### 5.3.3. Описание экспериментальной установки, порядок проведения эксперимента и методика обработки его результатов

Эксперимент выполняется на той же установке, что и при исследовании турбины. Она подробно описана в подразд. 3.4.2, с которым необходимо предварительно ознакомиться. Объектом исследования является компрессор турбохолодильника. В качестве привода компрессора используется турбина, работающая на сжатом воздухе, подводимом из компрессорной станции кафедры. Установка позволяет измерять параметры газа перед и за компрессором и турбиной, а также массовые расходы воздуха через эти агрегаты.

Согласно приведенным в подразд. 3.4.2 рекомендациям установку выводят на стационарный режим работы. Перед турбиной устанавливается избыточное давление  $\sim 3$  атм при полностью открытом кране 2I (см. рис. 3.5). Начиная с этого режима производят необходимые измерения. Изменение режима осуществляют прикрывая кран 2I и изменяя тем самым степень повышения давления газа и расход воздуха через компрессор.

Для каждого из исследованных режимов определяют адиабатный КПД компрессора и строят его графические зависимости от степени повышения давления газа в компрессоре  $\pi_k$  и расхода воздуха через компрессор  $G_{гк}$ . Для одного из режимов изображают процесс сжатия на  $P-v, T-S, i-S$  диаграммах.

### 5.4. Контрольные вопросы

1. Что называют коэффициентом полноты сгорания топлива в камере сгорания двигателя?
2. Какие факторы влияют на величину коэффициента полноты сгорания топлива?
3. На чем основан метод экспериментального определения коэффициента полноты сгорания топлива методом анализа состава продуктов сгорания?
4. На чем основан метод экспериментального определения коэффициента полноты сгорания топлива методом теплового баланса?

5. Какие допущения принимает при определении коэффициента полноты сгорания топлива методом теплового баланса?
6. Как определить мощность турбины по параметрам газа?
7. Разъяснить смысл внутреннего КПД турбины.
8. При каких допущениях получены выражения (5.22) и (5.28) для удельной технической работы потока?
9. Почему выражения (5.22) и (5.28) справедливы независимо от степени необратимости реальных процессов в турбине и компрессоре?
10. Как изменится полная температура газа за турбиной при уменьшении ее внутреннего КПД?
11. Какими способами можно определить техническую работу потока в турбине на использованной Вами экспериментальной установке?
12. Как изменится техническая работа потока в турбине, если обеспечить подвод теплоты к газу в процессе его расширения?
13. Как связаны техническая работа потока в турбине и работа привода компрессора с полезной внешней работой газа?
14. Разъяснить смысл адиабатного КПД компрессора.
15. Как изменится работа привода компрессора, если в процессе сжатия газа обеспечить отвод теплоты?
16. Изобразить на  $P-v$ ,  $T-s$ ,  $i-s$  диаграммах последовательные процессы расширения газа в турбине и сжатия в компрессоре, привод которого обеспечивается этой турбиной. Как изменятся параметры газа после осуществления этих процессов в случаях обратимого и необратимого их протекания?

Термоэлектрическая характеристика термопары  
с термоэлектродными материалами хромель-копсель

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	абс. мВ									
-40	-2,50	-2,56	-2,62	-2,68	-2,74	-2,81	-2,87	-2,93	-2,99	-3,05
-30	-1,89	-1,95	-2,01	-2,07	-2,13	-2,20	-2,26	-2,32	-2,38	-2,44
-20	-1,27	-1,33	-1,39	-1,46	-1,52	-1,58	-1,64	-1,70	-1,77	-1,83
-10	-0,64	-0,70	-0,77	-0,83	-0,89	-0,96	-1,02	-1,08	-1,14	-1,21
0(-)	0	-0,06	-0,13	-0,19	-0,26	-0,32	-0,38	-0,45	-0,51	-0,58
0(+)	0	0,07	0,13	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,52	0,59
10	0,65	0,72	0,78	0,85	0,91	0,98	1,05	1,11	1,18	1,24
20	1,31	1,38	1,44	1,51	1,57	1,64	1,70	1,77	1,84	1,91
30	1,98	2,05	2,12	2,18	2,25	2,32	2,38	2,45	2,52	2,59
40	2,66	2,73	2,80	2,87	2,94	3,00	3,07	3,14	3,21	3,28
50	3,35	3,42	3,49	3,56	3,63	3,70	3,77	3,84	3,91	3,98
60	4,05	4,12	4,19	4,26	4,33	4,41	4,48	4,55	4,62	4,69
70	4,76	4,83	4,90	4,98	5,05	5,12	5,20	5,27	5,34	5,41
80	5,48	5,56	5,63	5,70	5,78	5,85	5,92	5,99	6,07	6,14
90	6,21	6,29	6,36	6,43	6,51	6,58	6,65	6,73	6,80	6,87
100	6,95	7,03	7,10	7,17	7,25	7,32	7,40	7,47	7,54	7,62
110	7,69	7,77	7,84	7,91	7,99	8,06	8,13	8,21	8,28	8,35
120	8,43	8,50	8,58	8,65	8,73	8,80	8,88	8,95	9,03	9,10
130	9,18	9,25	9,33	9,40	9,48	9,55	9,63	9,70	9,78	9,85
140	9,93	10,00	10,08	10,16	10,23	10,31	10,38	10,46	10,54	10,61
150	10,69	10,77	10,85	10,92	11,00	11,08	11,15	11,23	11,31	11,38
160	11,46	11,54	11,62	11,69	11,77	11,85	11,93	12,00	12,08	12,16
170	12,24	12,32	12,40	12,48	12,55	12,63	12,71	12,79	12,87	12,95
180	13,03	13,11	13,19	13,27	13,36	13,44	13,52	13,60	13,68	13,76
190	13,84	13,92	14,00	14,08	14,16	14,25	14,33	14,41	14,49	14,57
200	14,66	14,74	14,82	14,90	14,99	15,07	15,15	15,23	15,31	15,39
210	15,48	15,56	15,64	15,72	15,80	15,89	15,97	16,05	16,13	16,21
220	16,30	16,38	16,46	16,54	16,62	16,71	16,79	16,87	16,95	17,03
230	17,12	17,20	17,28	17,37	17,45	17,53	17,62	17,70	17,78	17,87
240	17,95	18,03	18,11	18,19	18,28	18,36	18,44	18,52	18,61	18,69

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	абс. мм									
250	18,77	18,85	18,93	19,02	19,10	19,18	19,27	19,35	19,45	19,52
260	19,60	19,68	19,76	19,85	19,93	20,01	20,10	20,18	20,26	20,35
270	20,43	20,51	20,59	20,67	20,75	20,84	20,92	21,00	21,08	21,16
280	21,25	21,33	21,41	21,50	21,58	21,66	21,74	21,83	21,91	21,99
290	22,08	22,16	22,24	22,33	22,41	22,49	22,58	22,66	22,74	22,82
300	22,91	22,99	23,08	23,16	23,24	23,33	23,41	23,50	23,58	23,67
310	23,75	23,84	23,92	24,01	24,09	24,18	24,26	24,35	24,43	24,52
320	24,60	24,69	24,77	24,86	24,94	25,03	25,11	25,20	25,28	25,37
330	25,45	25,54	25,62	25,71	25,79	25,87	25,96	26,04	26,13	26,22
340	26,31	26,39	26,48	26,56	26,65	26,74	26,82	26,91	26,99	27,08
350	27,16	27,25	27,33	27,42	27,50	27,59	27,67	27,76	27,84	27,93
360	28,02	28,11	28,20	28,28	28,37	28,46	28,55	28,63	28,72	28,81
370	28,89	28,98	29,07	29,15	29,24	29,33	29,41	29,50	29,59	29,67
380	29,76	29,84	29,93	30,01	30,10	30,18	30,27	30,35	30,44	30,53
390	30,62	30,71	30,80	30,88	30,97	31,06	31,14	31,23	31,33	31,40
400	31,49	31,58	31,67	31,75	31,84	31,93	32,01	32,10	32,19	32,27

Приложение 2  
Удельная теплоемкость газов  $C_p$ , кДж/(кг·К)

T	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO
298,15	0,9181	1,0396	0,8438	1,8656	1,0404
300	0,9490	1,0397	0,8457	1,8661	1,0404
400	0,9409	1,0441	0,9391	1,8954	1,0475
500	0,9717	1,0559	1,0140	1,9467	1,0636
600	1,0029	1,0748	1,0754	2,0144	1,0867
700	1,0308	1,0978	1,1263	2,0875	1,1128
800	1,0544	1,1221	1,1689	2,1616	1,1398
900	1,0739	1,1455	1,2045	2,2348	1,1629
1000	1,0900	1,1672	1,2343	2,3061	1,1845

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Беляев Н.М. Термодинамика. - Киев: Вища школа, 1987. - 344 с.
- Зубарев В.Н., Александров А.А., Охотин В.С. Практикум по технической термодинамике. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 304 с.
- Кириллия В.А., Сычев В.В., Шейндлих А.Е. Техническая термодинамика. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 416 с.
- Лабораторный практикум по термодинамике и теплопередаче/ Под ред. В.И. Крутова и Е.В. Шишова. - М.: Высш. шк., 1988. - 216с.
- Нечитайло К.Ф. Уравнения состояния газов: Учеб. пособие по лабораторным работам. - Харьков.: Харьк. авиац. ин-т, 1982. - 20 с.
- Нечитайло К.Ф. Закон сохранения энергии в термодинамической системе: Учеб. пособие по лабораторным работам. - Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1982. - 24 с.
- Нечитайло К.Ф. Полупроводниковые процессы: Учеб. пособие по лабораторным работам. - Харьков.: Харьк. авиац. ин-т, 1982. - 30 с.
- Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы. 3-е изд. - М.: Энергия, 1978. - 705 с.
- Техническая термодинамика/ Под ред. В.И. Крутова. - М.: Высш. шк., 1981. - 472 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1.	<u>ВВЕДЕНИЕ</u> .....	3
2.	<u>ТЕРМИЧЕСКИЕ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ГАЗОВ</u> .....	4
	2.1. <u>Общие положения</u> (4). 2.1.1. Термическое уравнение состояния идеального газа (5). 2.1.2. Термические уравнения состояния реальных газов (7). 2.2. <u>Лабораторная работа № 1. Анализ продуктов сгорания как смеси идеальных газов</u> (II). 2.2.1. Задание (II). 2.2.2. Описание экспериментальной установки (II). 2.2.3. Измеряемые величины и средства измерений (13). 2.2.4. Порядок проведения эксперимента (16). 2.2.5. Методика обработки результатов эксперимента (17). 2.3. <u>Лабораторная работа № 2. Исследование изотермического сжатия углекислого газа</u> (19). 2.3.1. Задание (19). 2.3.2. Описание экспериментальной установки (19). 2.3.3. Измеряемые величины и порядок проведения эксперимента (21). 2.3.4. Методика обработки результатов эксперимента (22). 2.4. <u>Контрольные вопросы</u> (23).	
3.	<u>ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ</u> .....	24
	3.1. <u>Общие положения</u> (24). 3.1.2. Аналитические выражения первого начала термодинамики (24). 3.2. <u>Лабораторная работа № 3. Исследование процесса разделения потока в вихревой трубе</u> (29). 3.2.1. Задание (30). 3.2.2. Описание экспериментальной установки (30). 3.2.3. Порядок проведения эксперимента (30). 3.2.4. Методика обработки результатов эксперимента (32). 3.3. <u>Лабораторная работа № 4. Заполнение вакуумированного сосуда атмосферным воздухом</u> (33). 3.3.1. Задание (33). 3.3.2. Описание экспериментальной установки (33). 3.3.3. Порядок проведения эксперимента (34). 3.3.4. Методика обработки результатов эксперимента (35). 3.4. <u>Лабораторная работа № 5. Энергобаланс в турбохолодильнике</u> (37). 3.4.1. Задание (37). 3.4.2. Описание экспериментальной установки (37). 3.4.3. Порядок проведения эксперимента (40). 3.4.4. Методика обработки результатов эксперимента (41). 3.5. <u>Контрольные вопросы</u> (41).	



4. ПОЛИТРОПНЫЕ ПРОЦЕССЫ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА.....42
- 4.1. Общие положения (42). 4.1.1. Условия реализации и уравнения политропного процесса (42). 4.1.2. Энергетические характеристики политропного процесса (45). 4.1.3. Частные случаи политропного процесса и его обобщающее значение (45). 4.1.4. Определение показателя политропы по результатам опытного исследования процесса (46).
- 4.2. Лабораторная работа № 6. Анализ процесса сжатия воздуха в цилиндре поршневого двигателя (49). 4.2.1. Задание (49). 4.2.2. Описание экспериментальной установки (49). 4.2.3. Порядок проведения эксперимента (50). 4.2.4. Методика обработки результатов эксперимента (51).
- 4.3. Лабораторная работа № 7. Подвод теплоты в камере сгорания газотурбинного двигателя (52). 4.3.1. Задание (52). 4.3.2. Описание экспериментальной установки (53). 4.3.3. Порядок проведения эксперимента (55). 4.3.4. Методика обработки результатов эксперимента (56).
- 4.4. Лабораторная работа № 8. Расширение воздуха в сосуде при истечении из него (57). 4.4.1. Сущность изучаемого процесса (57). 4.4.2. Задание (58). 4.4.2. Описание экспериментальной установки (58). 4.4.3. Порядок проведения эксперимента (59). 4.4.4. Методика обработки результатов эксперимента (59).
- 4.5. Контрольные вопросы (60).
5. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕМЕНТАХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК.....61
- 5.1. Лабораторная работа № 9. Определение коэффициента полноты сгорания топлива в камере сгорания (61). 5.1.1. Задание (61). 5.1.2. Описание экспериментальной установки и измеряемые величины (62). 5.1.3. Порядок проведения эксперимента и методика обработки его результатов (63).
- 5.2. Лабораторная работа № 10. Техническая работа потока газа в турбине (67). 5.2.1. Общие положения (67). 5.2.2. Задание (69). 5.2.3. Описание экспериментальной установки, порядок проведения эксперимента и методика обработки его результатов (70).
- 5.3. Лабораторная работа № 11. Техническая работа потока газа в компрессоре (70).

- 5.3.1. Общие положения (70). 5.3.2. Задание (72). 5.3.3. Описание экспериментальной установки, порядок проведения эксперимента и методы обработки его результатов (73).  
5.4. Контрольные вопросы (73).

ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	75
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	77
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	78

Михаил Александрович Беспятов  
Константин Федорович Нечитайло  
Вадим Григорьевич Селиванов  
Валентин Леонидович Симбирский  
Сергей Дмитриевич Фролов

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Редактор Л.А. Кузьменко

Св. план, 1990, поз. 51

Подписано в печать 26.12.90

Формат 60x84 1/16. Бум. офс. № 2. Офс. печ.

Усл. печ. л. 4,3 Уч.-изд. л. 4,5т. 625 экз. Заказ 298. Цена 24 к.

Харьковский авиационный институт

310191, Харьков-191, ул. Чкалова, 17

Ротапринт топографии ХАИ

310191, Харьков-191, ул. Чкалова, 17