

Е.М. Шадрина, А.С. Кувшинова

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА

«Термодинамические процессы идеальных газов»

Учебное пособие

Иваново

2011

Министерство образования и науки Российской Федерации
Ивановский государственный химико-технологический универси-
тет

Е.М. Шадрина, А.С. Кувшинова

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА

«Термодинамические процессы идеальных газов»

Учебное пособие

Иваново 2011

УДК 536(072)

Шадрина, Е.М. Термодинамические процессы идеальных газов: учеб. пособие/ Е.М. Шадрина, А.С. Кувшинова; Иван. гос. хим. – технол. ун – т. – Иваново, 2011. – 83 с.

Курс «Техническая термодинамика и теплотехника» входит в число дисциплин, составляющих основу инженерной подготовки в химико-технологических вузах.

В учебном пособии рассмотрены законы идеальных газов, расчеты термодинамических процессов с идеальными газами, методы определения параметров рабочего тела, изменения энтальпии, энтропии, внутренней энергии газа и совершаемой им работы, прямые термодинамические циклы и методы их расчета, истечение и дросселирование газов. Приведены примеры решения задач и задачи для самостоятельного решения.

Предназначено студентам ИГХТУ всех направлений подготовки при изучении курсов «Техническая термодинамика и теплотехника» и «Теплотехника».

Табл. . Ил. Библиогр.: 10 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Ивановского государственного химико-технологического университета.

Рецензенты:

д.т.н., проф. Пантелеев Е.Р. (Ивановский государственные энергетический университет)

д.т.н., проф. Сокольский А.И. (Ивановский государственный строительный университет, кафедра «Теплогазоснабжения и вентиляции»)

Оглавление

Глава 1.	Рабочее тело и его параметры.....	4
1.1.	Основные понятия и определения.....	4
1.2.	Параметры состояния идеального газа.....	6
1.3.	Законы идеальных газов.....	9
1.4.	Газовые смеси.....	11
Глава 2.	Теплоемкость газов.....	13
2.1.	Вычисление значений теплоемкостей. Постоянная теплоемкость.....	13
2.2.	Переменная теплоемкость. Истинная и средняя теплоемкость. Табличные значения теплоемкостей...	14
2.3.	Теплоемкость газовых смесей.....	16
Глава 3.	Первый закон термодинамики и его приложение к физическим процессам.....	16
3.1.	Закон сохранения энергии. Эквивалентность тепловой и механической энергии.....	16
3.2.	Методы изучения и основные определения.....	21
3.3.	Частные случаи первого закона термодинамики.....	23
Глава 4.	Второй закон термодинамики. Круговые термодинамические процессы.....	31
4.1.	Второй закон термодинамики.....	31
4.2.	Цикл Карно.....	33
4.3.	Циклы газотурбинных установок (ГТУ).....	36
4.4.	Циклы двигателей внутреннего сгорания (ДВС).....	39
Глава 5.	Изменение состояния газов при перемещении.....	45
5.1.	Истечение газов. I закон термодинамики для потока..	45
5.2.	Способы преобразования тепловой энергии в тепловых двигателях.....	48
Глава 6.	Компрессия (сжатие) газов.....	50
6.1.	Идеальный цикл одноступенчатого поршневого компрессора.....	51
6.2.	Многоступенчатое сжатие.....	54
Глава 7.	Задачи.....	57
7.1.	Примеры решения задач.....	57
7.2.	Контрольные задачи.....	64
7.3.	Задачи для самостоятельного решения.....	75
	Список литературы.....	81
	Приложение.....	82

Глава 1. Рабочее тело и основные расчеты

Название наука «термодинамика» получила от двух греческих слов «термо» - теплота и «динамика» - сила, движение (работа), так как в начале своего развития рассматривала законы преобразования тепловой и механической энергии. Современная термодинамика проникла и в другие области знания и изучает количественные и качественные связи в процессах преобразования различных видов энергии.

Различают химическую и техническую термодинамику. *Химическая термодинамика* рассматривает законы преобразования энергии на микроуровне (в молекулах, атомах и т.д.), а *техническая* – на макроуровне, т.е. в больших объема газа или пара.

На основе законов технической термодинамики производятся расчеты и проектирования котельных станций, тепловых и паросиловых установок, двигателей внутреннего сгорания, реактивных двигателей, компрессионных и холодильных установок, тепловых и атомных электростанций, систем теплоснабжения, т.е. установок, где имеет место преобразование тепловой энергии в механическую (работу).

1.1. Основные понятия и определения

Макроскопическая система (макросистема) – материальный объект, состоящий из большого числа микрочастиц. Примером макросистемы являются капли, струи, пузыри газа или пара.

Объектом исследования технической термодинамики является термодинамическая система. *Термодинамическая система* - это совокупность макроскопических тел, находящихся в механическом и тепловом взаимодействии друг с другом и с окружающей средой.

Окружающая среда - это все то, что лежит за границами термодинамической системы. Примером термодинамической системы (рабочего тела) служит газ, находящийся в цилиндре с поршнем.

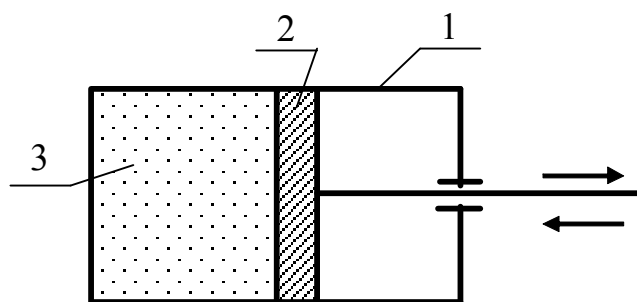


Рис.1.1. Цилиндр с поршнем:

1 – корпус цилиндра; 2 – поршень; 3 – газ, находящийся внутри цилиндра

Термодинамическая система, не обменивающаяся с окружающей средой веществом, (масса газа остается постоянной) – это **закрытая** система. Примером закрытой термодинамической системы может служить газ внутри цилиндра с подвижным поршнем. Если обмен веществом происходит - это **открытая** система (потоки газа или пара, поступающие на лопатки турбины; продукты сгорания, выходящие из сопла реактивного двигателя в атмосферу). Система, не обменивающаяся с окружающей средой теплотой, называется **термоизолированной** или **адиабатной** (от греческого слова адиабата - непередаваемо).

Преобразование тепловой энергии в механическую происходит с помощью **рабочего тела**. Молекулярное строение вещества предполагает наличие сил сцепления между молекулами. По характеру взаимодействия и расстоянию между молекулами различают 3 агрегатных состояния вещества: твердое, жидкое, газообразное, четвертое агрегатное состояние – плазма, в данном учебном пособии не рассматривается.

В твердых телах атомы наиболее близки друг к другу, а силы сцепления наиболее значительны. Атомы не движутся поступательно, а совершают только вращательное и колебательное движение около своего среднего положения.

В жидкостях силы сцепления меньше, молекулы могут двигаться поступательно, но это движение стеснено ввиду малого расстояния между молекулами.

При переходе тела в газообразное состояние объем его, а следовательно, и расстояние между молекулами значительно увеличи-

вается, силы сцепления уменьшаются. Одновременно уменьшается влияние объема самих молекул в сравнении с общим объемом системы.

Наиболее эффективным рабочим телом является вещество с явно выраженными упругими свойствами, позволяющими системе деформироваться – изменять свой объем при расширении и сжатии, нагреве и охлаждении, т.е. газы и пары.

При достаточном удалении молекул газа друг от друга размером молекул и силами взаимодействия между ними можно пренебречь. В таком случае газ по своим свойствам соответствует идеальному газу.

Идеальный газ – это воображаемый газ, в котором можно пренебречь размером и силами взаимодействия молекул.

Для технической термодинамики вполне допустимо считать идеальным газ, далекий от состояния ожидения, т.е. находящийся при достаточно низком давлении и высокой температуре. Примером идеального газа является воздух при нормальных физических условиях.

Действительные, существующие в природе газы, в которых нельзя пренебрегать размером и силами взаимодействия между молекулами, т.е. газы близкие к ожидению или частично сжиженные – являются **реальными газами**, т.е. газы при достаточно высоком давлении и низкой температуре. Примером реального газа является водяной пар – вода, переведенная нагреванием и кипением в частично или полностью газообразное состояние.

Состояние вещества зависит от параметров, т.е. давления, температуры и объема системы.

1.2. Параметры состояния идеального газа

Физическое состояние рабочего тела характеризуется величинами, которые называют термодинамическими параметрами состояния. В качестве основных термодинамических параметров принимают удельный объем, абсолютное давление и абсолютную температуру.

Изменение одного или нескольких параметров состояния тела вследствие нагрева или охлаждения, расширения или сжатия, называется термодинамическим процессом. Если параметры не изменяются, то рабочее тело находится в равновесном состоянии.

Удельным объемом называется объем единицы массы вещества:

$$v = \frac{V}{m}, \quad (1.1)$$

где v – удельный объем, $\text{м}^3/\text{кг}$; V – объем системы, м^3 ; m – масса вещества, кг .

Плотность - масса единицы объема, обратно пропорциональна удельному объему:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v}, \quad (1.2)$$

где ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Объем в «СИ» измеряется в кубических метрах (м^3).

$$1\text{м}^3 = 10^3 \text{ л} \quad \text{или} \quad 1\text{л} = 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Давление газа обуславливается совокупностью ударов беспорядочно движущихся молекул о стенки сосуда, в котором заключен газ, и представляет собой нормальную составляющую силы Ψ , действующую на единицу площади F поверхности стенки:

$$P = \Psi / F, \quad (1.3)$$

где Ψ - сила, Н ; F – площадь поверхности, м^2 ; P – давление, Па .

Международной системой единиц (СИ) за единицу давления принимается Паскаль (Па) - сила, действующая на 1м^2 поверхности, $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н}/\text{м}^2$.

Для практического пользования вводится внесистемная единица давления - бар:

$$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}.$$

В технических приборах для измерения давления используется техническая атмосфера:

$$1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс}/\text{см}^2 = 0,98 \cdot 10^5 \text{ Па} = 0,98 \text{ бар}.$$

Для измерения атмосферного давления используют барометры, выше атмосферного - манометры, ниже атмосферного - вакуумметры.

Давление, превышающее атмосферное, называют избыточным.

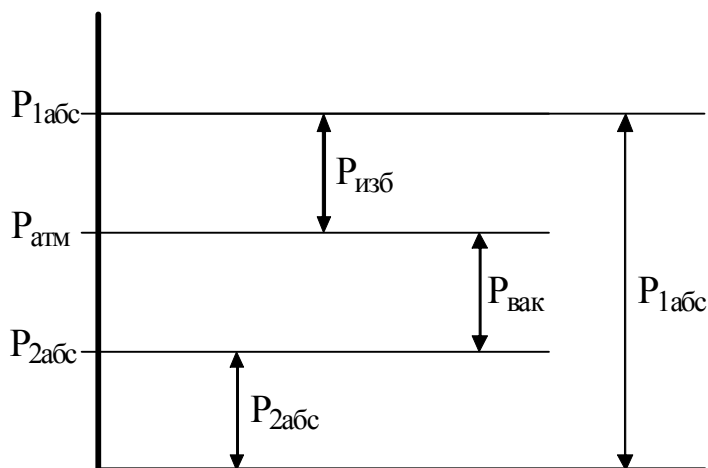
Если давление в сосуде превышает атмосферное, то:

$$P_{1 \text{ абс.}} = P_{\text{атм.}} + P_{\text{изб.}} \quad (1.4)$$

Если давление в сосуде ниже атмосферного, то:

$$P_{2 \text{ абс.}} = P_{\text{атм.}} - P_{\text{вак.}} \quad (1.5)$$

Расчет давления в системе проиллюстрирован рис. 1.2.



$$P_{1 \text{ абс.}} > P_{\text{атм.}}$$

$$P_{2 \text{ абс.}} < P_{\text{атм.}}$$

Рис. 1.2. Расчет давления в системе:

$P_{\text{атм.}}$ - атмосферное (барометрическое) давление; $P_{\text{изб.}}$ - избыточное давление; $P_{\text{вак.}}$ - величина вакуума; $P_{1,2 \text{ абс.}}$ - абсолютное давление в системе

Величину, характеризующую степень нагретости тела, называют **температурой**. Кинетическая энергия молекул зависит от температуры. При подводе теплоты к телу скорость движения молекул увеличивается, и их механическая энергия переходит в тепловую. При этом тело нагревается, его температура повышается; при отводе теплоты движение молекул замедляется, тело охлаждается, его температура понижается.

Температуру измеряют термометрами, которые могут иметь различные температурные шкалы. Температурную шкалу градуируют следующим образом. Выбирают две произвольные температуры - реперные точки - и делят этот температурный интервал на некоторое число равных частей - градусов.

Обычно за реперные точки принимают температуры плавления льда и кипения воды. Цену деления (градус) определяют делением разности этих температур на 100.

В технической термодинамике чаще применяют две температурные шкалы.

1. Термодинамическая абсолютная шкала температур предложена в 1848 г. английским физиком Виллиамом Томсоном (1824 - 1907г.г.). Ее называют шкалой Кельвина, а единицу температуры - Кельвин (К).

Температура плавления льда T_0 по шкале Кельвина равна 273,16 К, а температура кипения воды $T_{\text{кип}} = 373,16$ К. В системе СИ "Кельвин" устанавливается по интервалу температуры от абсолютного нуля до температуры тройной точки воды. Тройная точка воды - это температура, при которой вода, водяной пар и лед находятся в равновесии 273,16 К. Таким образом, 1 Кельвин равен $1/273,16$ части температурного интервала от абсолютного нуля до температуры тройной точки воды.

2. В технике и быту часто используют температурную шкалу Цельсия, предложенную шведским физиком Цельсием в 1742 г. По этой шкале температуру измеряют в градусах Цельсия ($^{\circ}\text{C}$).

Температура таяния льда принята за 0°C , температура кипения воды принята за 100°C . Температура, измеряемая по этой шкале, связана с абсолютной температурой соотношением:

$$t = T - 273,16 \quad \text{или} \quad T = t + 273,16, \quad (1.6)$$

где t – температура, выраженная в градусах Цельсия, $^{\circ}\text{C}$; T – абсолютная температура, К.

В шкалах Кельвина и Цельсия линейные размеры, соответствующие одному градусу, одинаковы, поэтому любую температуру можно выразить в градусах Цельсия ($^{\circ}\text{C}$) или Кельвинах (К). Иногда в задачах рассматривается газ, взятый при **нормальных физических условиях (н.у.)**, т.е. при давлении $P_0 = 1,01 \cdot 10^5$ Па и $T_0 = 273$ К ($t_0 = 0^{\circ}\text{C}$).

1.3. Законы идеальных газов

В XVII - XVIII веках на основании наблюдений физиков над идеальными газами получены эмпирические зависимости, известные под названием законов идеальных газов.

Закон Бойля - Мариотта: при изотермическом ($T_1 = T_2$ или $T = \text{const}$) расширении или сжатии газа абсолютное давление изменяется обратно пропорционально изменению объема:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1}, \quad (1.7)$$

где P – давление, Па; V – объем, м^3 , индекс 1 относится к начальному, а 2 - конечному состоянию газа в ходе термодинамического процесса.

Закон Гей-Люссака: при изобарном ($P_1 = P_2$ или $P = \text{const}$) нагреве или охлаждении объем газа изменяется прямо пропорционально абсолютной температуре:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}, \quad (1.8)$$

где T - абсолютная температура, К.

Закон Шарля: при изохорном ($V_1 = V_2$ или $V = \text{const}$) нагреве или охлаждении абсолютное давление газа изменяется прямо пропорционально абсолютной температуре:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (1.9)$$

Закон Авагадро: при нормальных физических условиях ($P_0 = 1,01 \cdot 10^5$ Па и $T_0 = 273$ К или $t_0 = 0$ °С). 1 киломоль (1 кмоль) газа занимает объем, равный $22,4 \text{ м}^3$.

Если параметры газа постоянны во времени и одинаковы во всех точках объема данного газа, термодинамическую систему считают **равновесной**.

Для равновесного состояния газа между его термодинамическими параметрами состояния P , V , T существует вполне определенная аналитическая зависимость, называемая уравнением состояния идеального газа. Эта зависимость получена в сравнительно простом виде из законов Бойля-Мариотта и Гей-Люссака:

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2} = \text{const}. \quad (1.10)$$

Для любого состояния идеального газа отношение произведения абсолютного давления на объем к абсолютной температуре - величина постоянная, которая зависит от природы газа, т.е. является физической константой вещества и называется **характеристической газовой постоянной**:

$$P \cdot V = m \cdot R \cdot T \quad \text{или} \quad R = \frac{P \cdot V}{m \cdot T} = \frac{R_0}{M}, \quad (1.11)$$

для 1 кг газа: $P \cdot v = R \cdot T$,

где P – давление, Па; V – объем, м³; T – абсолютная температура, К;

m – масса, кг; R – характеристическая газовая постоянная, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;

$R_0 = 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$ – универсальная газовая постоянная.

Это уравнение однозначно связывает между собой параметры состояния и называется уравнением состояния идеального газа **Менделеева - Клапейрона**, при помощи которого можно рассчитать неизвестные параметры газа.

1.4. Газовые смеси

В технике в качестве рабочего тела используют как отдельно взятые газы (O_2 , CO_2 , N_2 и т.д.), так и их смеси (воздух – смесь N_2 , O_2 , CO_2 , Ar , He и т.д.), которые могут рассматриваться как идеальные, подчиняющиеся законам идеальных газов, и их состояние может быть описано уравнением Менделеева - Клапейрона.

Для таких рабочих тел предполагается, что:

- компоненты не вступают в химическое взаимодействие;
- каждый из компонентов имеет температуру, равную температуре смеси;
- каждый газ имеет определенное давление, называемое парциальным.

Парциальное давление компонента газовой смеси - это такое давление, которое оказывает данный компонент, имеющий температуру смеси при условии, что он занимает весь объем смеси.

Закон Дальтона: общее давление равно сумме парциальных давлений компонентов газовой смеси:

$$P_{\text{см}} = P_1^* + P_2^* + \dots + P_i^*, \quad (1.12)$$

где $P_{\text{см}}$ - давление смеси, Па; P_1^* , P_2^* P_i^* - парциальные давления соответствующих компонентов, Па.

Парциальный объем - это объем компонента газовой смеси, имеющего температуру и давление смеси. Сумма парциальных объемов компонентов равна объему смеси газов:

$$V_{\text{см}} = V_1^* + V_2^* + \dots + V_i^* \quad (1.13)$$

где $V_{\text{см}}$ – объем смеси газов, V_i^* – парциальный объем компонента газовой смеси.

Количественное соотношение отдельных компонентов обычно задают массовыми, объемными или мольными долями.

Массовые доли:

$$g_1 = \frac{m_1}{m_{\text{см}}}, g_2 = \frac{m_2}{m_{\text{см}}}, \dots, g_i = \frac{m_i}{m_{\text{см}}}, \quad (1.14)$$

где g – массовая доля компонента газовой смеси, масс. доли; $m_{\text{см}}$ – масса газовой смеси, кг; m_1, m_2, \dots, m_i – массы компонентов, кг.

Объемные доли:

$$r_1 = \frac{V_1}{V_{\text{см}}}, r_2 = \frac{V_2}{V_{\text{см}}}, \dots, r_i = \frac{V_i}{V_{\text{см}}}, \quad (1.15)$$

где r – объемная доля компонента газовой смеси, об. доли; $V_{\text{см}}$ – объем газовой смеси, м^3 ; V_1, V_2, \dots, V_i – парциальные объемы компонентов, м^3 .

Соотношения между объемными и массовыми долями:

$$g_i = r_i \cdot \frac{M_i}{M_{\text{см}}} = r_i \cdot \frac{R_{\text{см}}}{R_i}, \quad (1.16)$$

$$r_i = g_i \cdot \frac{M_{\text{см}}}{M_i} = g_i \cdot \frac{R_i}{R_{\text{см}}}, \quad (1.17)$$

где $M_{\text{см}}$ – молярная масса смеси, кг/кмоль; $R_{\text{см}}$ – характеристическая постоянная смеси, Дж/(кг · К); R_i – характеристическая газовая постоянная i –го компонента, Дж/(кг · К); M_i – молярная масса i – компонента, кг/кмоль.

Плотность смеси газов:

$$\rho_{\text{см}} = \sum_{i=1}^{i=n} r_i \cdot \rho_i; \quad (1.18)$$

где $\rho_{\text{см}}$ – плотность смеси газов, $\text{кг}/\text{м}^3$; ρ_i – плотность i –го компонента, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Молярная масса смеси газов:

$$M_{см} = \sum_{i=1}^{i=n} r_i \cdot M_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{M_i}}; \quad (1.19)$$

Характеристическая газовая постоянная смеси:

$$R_{см} = \frac{R_0}{M_{см}} = \sum_{i=1}^{i=n} g_i \cdot R_i \quad (1.20)$$

$$R_{см} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{r_i}{R_i}} = \frac{R_0}{\sum_{i=1}^{i=n} r_i \cdot M_i} .$$

Характеристические газовые постоянные для компонентов газовой смеси представлены в таблице 1 приложения.

Глава 2. Теплоемкость газов

2.1. Вычисление значений теплоемкостей.

Постоянная теплоемкость

Способность тела воспринимать теплоту характеризуется теплоемкостью. Для того чтобы нагреть два различных вещества с одинаковой массой до одной и той же температуры, необходимо подвести различное количество теплоты, т.е. каждое тело по-своему воспринимает теплоту.

Различают массовую, объемную и мольную теплоемкость.

Удельная массовая теплоемкость – это количество теплоты, необходимое для нагрева 1 кг вещества на 1 градус или количество теплоты, отводимое от 1 кг вещества для охлаждения его на 1 градус.

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}, \quad (2.1)$$

где c – удельная массовая теплоемкость, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; Q – количество подводимой или отводимой теплоты, Дж; m – масса вещества, кг; ΔT – разность температур, К.

По аналогии с массовой теплоемкостью можно дать определение для объемной (c') и мольной теплоемкости (c_μ), т.е. это количество теплоты на нагрев или охлаждение 1 м³ или 1 кмоль вещества.

Связь между теплоемкостями:

$$c = \frac{c_\mu}{M}, \quad (2.2)$$

$$c' = \rho \cdot c, \quad (2.3)$$

$$c' = \frac{c_\mu \cdot \rho}{M}, \quad (2.4)$$

Теплоемкость является функцией состояния вещества и определяется величиной внутренней (тепловой) энергии вещества, которая включает в себя кинетическую энергию поступательного, вращательного и колебательного движения молекул и потенциальной энергии взаимодействия частиц. Все эти составные части внутренней энергии являются функцией температуры, давления и объема, т.е. параметров рабочего тела. Если внутренняя энергия относится к конкретному состоянию вещества, то количество подводи-

мой или отводимой теплоты относится к термодинамическому процессу, поэтому для определенного состояния вещества при заданных параметрах теплоемкость является *постоянной*, а для процесса теплоемкость изменяется в зависимости от температуры и давления.

2.2. Переменная теплоемкость. Истинная и средняя теплоемкость. Табличные значения теплоемкостей

В некоторых случаях эта зависимость теплоемкости от температуры может быть значительной, поэтому вводят понятия истинной и средней теплоемкости.

Истинная теплоемкость - это производная от количества теплоты, подведенной к телу, по температуре этого тела:

$$c = \frac{dQ}{m \cdot dT} \quad (2.5)$$

Опыт и теоретические положения, вытекающие из квантовой теории теплоемкости, показывают, что теплоемкость зависит от температуры и давления.

Средняя теплоемкость - это теплоемкость в интервале температур $T_1 \div T_2$ данного процесса:

$$c = \frac{Q}{m \cdot (T_2 - T_1)}, \quad (2.6)$$

где c – удельная массовая теплоемкость, Дж/(кг К); Q – подводимая теплота, Дж; m – масса вещества, кг; T_1 и T_2 – начальная и конечная температуры, К. Разность температур можно выражать в градусах Цельсия, т.к. численное значение ΔT не изменится, т.е. $\Delta T = T_2 - T_1 = t_2 - t_1$.

В практических расчетах при определении количества теплоты применяют средние теплоемкости:

$$c \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{c \Big|_0^{t_2} \cdot t_2 - c \Big|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}, \quad (2.7)$$

Подводить теплоту можно двумя путями: при постоянном давлении ($P = \text{const}$) или при постоянном объеме ($V = \text{const}$). Поэтому различают теплоемкость изобарную - C_p и изохорную – C_v . При этом расходуется различное количество теплоты - при изобарном нагреве Q_p и изохорном - Q_v . Согласно I закону термодинами-

ки: $Q_p = \Delta U + L$, в случае нагрева газа при постоянном объеме, работа будет равна 0, т.е. уравнение примет вид: $Q_p = \Delta U$, следовательно $Q_p > Q_v$ на величину работы, следовательно $C_p > C_v$. Соотношение между ними выражается формулой Майера:

$$C_p - C_v = R, \quad (2.8)$$

где c_p – изобарная теплоемкость; c_v – изохорная теплоемкость; R – характеристическая газовая постоянная, Дж/ (кг К) или кДж/(кг К).

На практике для точного расчета истинной теплоемкости используют интерполяционные уравнения типа:

$$C = C_0 + a \cdot t + b \cdot t^2 + \dots, \quad (2.9)$$

где C_0 – теплоемкость при 0°C , «а» и «b» - эмпирические коэффициенты; t – средняя температура, $^\circ\text{C}$.

Для наиболее часто встречающихся газов интерполяционные линейные уравнения представлены в таблице 2 приложения.

2.3. Теплоемкость газовых смесей

Как было отмечено выше, свойства смесей газов зависят от состава, т.е. от концентрации и свойств компонентов.

Теплоемкость газовых смесей вычисляют по уравнениям:

- удельная массовая теплоемкость пропорциональна массовым долям компонентов:

$$c_{см} = \sum_{i=1}^{i=n} c_i \cdot g_i, \quad (2.10)$$

- удельная объемная теплоемкость пропорциональна объемным долям компонентов:

$$c'_{см} = \sum_{i=1}^{i=n} c'_i \cdot r_i, \quad (2.11)$$

- удельная мольная теплоемкость пропорциональна мольным долям компонентов:

$$\mu c_{см} = \sum_{i=1}^{i=n} \mu c_i \cdot r_i \quad (2.12)$$

Взаимосвязь теплоемкостей описана уравнениями (2.2 – 2.4).

Глава 3. Первый закон термодинамики и его приложение к физическим процессам

3.1. Закон сохранения энергии. Эквивалентность тепловой и механической энергии

Переход механической энергии в тепловую известен человечеству с ранних ступеней развития. Толчком к развитию человеческих знаний послужил обратный процесс преобразования тепловой энергии в механическую, потребление которой возрастало с развитием производительных сил общества.

Развитие кинетической теории материи дало возможность объяснить закон сохранения энергии как переход одной формы движения в другую и установить таким образом не только количественное, но и качественное содержание данного закона. Энергию движения макротел называют механической, энергию неупорядоченного движения микротел называют тепловой, т.е. тепловая энергия есть особая форма механической энергии. В этом заключается содержание первого закона термодинамики.

Первый закон термодинамики является частным случаем общего закона сохранения энергии, по которому энергия не исчезает и не возникает вновь, а только переходит из одного вида в другой. Он может быть сформулирован следующим образом: ***вся теплота, подведенная к телу, расходуется на изменение внутренней энергии и на совершение работы против внешних сил.***

Аналитическое выражение первого закона термодинамики записывается следующим образом:

$$Q_{1-2} = \Delta U + L_{1-2}, \quad (3.1)$$

Расчет термодинамической системы часто ведут на 1 кг газа, используя удельные величины теплоты (q), работы (ℓ), изменения внутренней энергии (Δu), изменения энтальпии (Δi) и изменения энтропии (Δs).

$$q = \frac{Q}{m}; \quad \ell = \frac{L}{m}; \quad \Delta u = \frac{\Delta U}{m}; \quad \Delta i = \frac{\Delta I}{m}; \quad \Delta s = \frac{\Delta S}{m}.$$

Для 1 кг рабочего тела уравнение первого начала термодинамики запишется следующим образом:

$$q_{1-2} = (u_2 - u_1) + \ell_{1-2} = \Delta u + \ell_{1-2}, \quad (3.2)$$

где Q_{1-2} – теплота, подводимая к рабочему телу в процессе 1 – 2, Дж; $\Delta U = (U_2 - U_1)$ – изменение внутренней энергии, Дж; L_{1-2} – ра-

бота против внешних сил, Дж; q_{1-2} , Δu , ℓ_{1-2} – удельные величины энергии, Дж/кг.

Каждый член уравнения I закона термодинамики может быть положительным, отрицательным или равным нулю. Рассмотрим каждое слагаемое данного уравнения в отдельности.

3.1.1. *Внутренняя энергия* системы включает в себя:

- кинетическую энергию поступательного, вращательного и колебательного движения молекул;
- потенциальную энергию взаимодействия частиц;
- энергию электронных оболочек;
- внутриядерную энергию.

Для процессов технической термодинамики, которая рассматривает макросистемы, последние две составляющие остаются неизменными, т.е. не происходит преобразования энергии на микроуровне. Поэтому под изменением внутренней энергии системы понимают изменение кинетической и потенциальной энергии частиц.

Кинетическая энергия частиц зависит от температуры (T), а потенциальная энергия определена расстоянием между молекулами, т.е. является функцией объема (V) и давления (P), следовательно, внутренняя энергия является функцией параметров состояния системы. Можно записать:

$$u = f(T, P) = f(V, P) = f(T, V). \quad (3.3)$$

В каждом состоянии рабочего тела его внутренняя энергия имеет свое значение, однако термодинамику интересует не абсолютное значение внутренней энергии в данный момент времени, а ее изменение в ходе термодинамического процесса:

$$\Delta U = \int_{u_1}^{u_2} dU = U_2 - U_1, \quad (3.4)$$

где ΔU - изменение внутренней энергии газа в ходе термодинамического процесса, Дж; U_1 и U_2 – абсолютное значение внутренней энергии в начальном (1) и конечном (2) состоянии, Дж.

Изменение внутренней энергии не зависит от характера процесса, а определяется только начальными и конечными параметрами системы. Поэтому для решения задач технической термодинамики за нулевое принято произвольное состояние системы при определенных параметрах.

Например:

- *для воды* условно принято, $U = 0$ при давлении $P = 1000$ Па (у отдельных авторов $P = 610$ Па) и температуре $T = 273$ К ($t = 0$ °С).
- *для газов*, $U = 0$ при $T = 273$ К или $t = 0$ °С и нормальном давлении $P = 1,0113 \cdot 10^5$ Па.

Для процессов, приводящих к увеличению температуры (нагрев и сжатие), изменение внутренней энергии положительно, т.е. $\Delta U > 0$; для процессов, приводящих к снижению температуры (охлаждение и расширение), изменение внутренней энергии отрицательно, т.е. $\Delta U < 0$. Для изотермических процессов расширения и сжатия идеальных газов $\Delta U = 0$.

3.1.2. Механическая энергия (работа)

Работа, как и в механике, определяется произведением силы на путь:

$$dL = \psi \cdot dx, \quad (3.5)$$

где L – работа, Дж; Ψ – сила против внешних сил, Н; x – перемещение поршня при расширении газа, м.

При взаимодействии с внешней средой рабочее тело может изменять свой объем. При этом происходит передача внутренней энергии от рабочего тела к внешней среде или наоборот. Работа, совершаемая рабочим телом против внешних сил при расширении газа, называется *работой расширения* и считается положительной. Работа, затрачиваемая внешними силами на сжатие рабочего тела, называется *работой сжатия* и считается отрицательной.

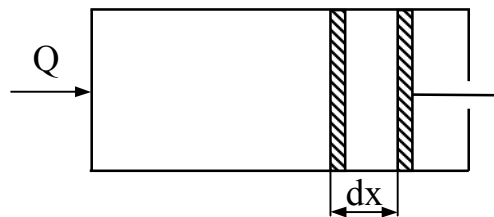


Рис. 3.1. Изменение объема газа при подводе теплоты

Из определения давления как силы (ψ), приходящейся на единицу поверхности (F): $P = \frac{\psi}{F} \frac{H}{M^2}$ (Па), выразим величину силы $\psi = P \cdot F$ и подставив в уравнение (3.5), получим:

$$dL = \psi \cdot dx = P \cdot F \cdot dx = P \cdot dV, \quad (3.6)$$

где L – работа против внешних сил; ψ – сила; P – давление; F – площадь поверхности.

При изменении параметров газа в процессе расширения работа процесса 1 - 2 будет выражаться уравнением:

$$L_{1-2} = \int_{V_1}^{V_2} P \cdot dV. \quad (3.7)$$

Работа зависит от вида процесса и параметров вещества, т.е. $L = f(P, V) = f(P, T) = f(T, V)$. Работа расширения (процесс идет с увеличением объема: нагрев и расширение) – положительна, т.е. $L > 0$. Работа сжатия (процесс идет с уменьшением объема: охлаждение и сжатие) – отрицательна, т.к. требует затрат энергии, $L < 0$. Для изохорных процессов нагрева и охлаждения $L = 0$.

3.1.3. Теплота. Понятие энтальпии и энтропии

Передача теплоты происходит микрофизическим путем, т.е. на молекулярном уровне и возможна либо при непосредственном контакте между частицами (теплопроводность), при смешении макрообъемов (конвекция) или на расстоянии (тепловое излучение).

Во всех случаях процесс переноса теплоты возможен только при разности температур между телами. Более подробно тепловые процессы рассматриваются в курсе «Процессы и аппараты химической технологии», поэтому в данной работе понятие теплоты дается только применительно к технической термодинамике.

Подставляя уравнения для расчета изменения внутренней энергии (3.4) и работы для процесса, идущего при постоянном давлении (изобарного) (3.6), в уравнение первого закона термодинамики (3.1), получим:

$$Q = (U_2 - U_1) + (P_2 \cdot V_2 - P_1 \cdot V_1) = (U_2 + P_2 \cdot V_2) - (U_1 + P_1 \cdot V_1) = I_2 - I_1, \quad (3.8)$$

где Q – теплота, Дж; $(U_2 - U_1)$ – изменение внутренней энергии, Дж; P – давление, Па; V – объем, м³; I – энтальпия, Дж.

Удельная энтальпия (теплосодержание) системы i , Дж/кг:

$$i = \frac{I}{m}, \quad i = u + P \cdot v. \quad (3.9)$$

Входящие в уравнение теплоты и энтальпии величины являются параметрами состояния вещества: $Q = f(P, V) = f(P, T) = f(T, V)$, а также $I = f(P, V) = f(P, T) = f(T, V)$.

Изменение энтальпии $\Delta i = i_2 - i_1$ в любом процессе определяется параметрами начального и конечного состояния системы и не зависит от вида процесса, поэтому для ряда веществ (воздух, вода и водяной пар) за нулевое значение $i = 0$ условно принято определенное состояние (см. раздел 3.1.1.).

Понятие энтропии было введено Клаузиусом:

$$dS = \frac{dQ}{T}, \quad (3.9)$$

где Q – теплота, Дж; T – абсолютная температура, К; S – энтропия, Дж/К.

Энтропия – это мера работоспособности системы, характеризуется мерой беспорядочности частиц, т.е. их степенью свободы. Изменение энтропии характеризуется начальными и конечными параметрами системы, т.е. $\Delta s = s_2 - s_1$.

Выразим из уравнения Менделеева – Клапейрона (1.13) для 1 кг вещества величину давления:

$P = \frac{RT}{v}$, заменим $du = c_v dT$, подставим в уравнение первого закона термодинамики и выразим из него изменение энтропии:

$$ds = \frac{dq}{T} = \frac{c_v \cdot dT + RT \frac{dv}{v}}{T} = c_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v}. \quad (3.10)$$

Решая уравнение (3.10) относительно энтропии, получим:

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \int_1^2 \left(\frac{dq}{T} \right) = \int_1^2 \left(c_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v} \right) = c_v \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) + R \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right). \quad (3.11)$$

Энтропия каждого конкретного состояния также зависит от параметров системы как теплота, работа и внутренняя энергия: $s = f(P, V) = f(P, T) = f(T, V)$. Изменение энтропии может быть больше 0, меньше 0 или равной 0. $\Delta S > 0$ для процессов расширения и нагрева, $\Delta S < 0$ для сжатия и охлаждения, $\Delta S = 0$ при расширении или сжатии, идущих без подвода или отвода теплоты ($\Delta Q = 0$) – адиабатных процессах.

3.2. Методы изучения и основные определения

Для изображения и исследования термодинамических процессов применяют графические методы. В термодинамике используют P-v-, T-s-диаграммы, которые строятся для 1 кг вещества.

На диаграммах состояние рабочего тела изображают точкой, а последовательное изменение состояний, т.е. термодинамический процесс - кривой или прямой линией, вид которой зависит от характера процесса. Существует несколько видов идеальных термодинамических процессов: изобарный (нагрев или охлаждение) – идущий при постоянном давлении ($P = \text{const}$ или $P = c$), изотермический (расширение или сжатие) – идущий при постоянной температуре ($T = \text{const}$ или $T = c$), изохорный (нагрев или охлаждение) – идущий при постоянном объеме ($V = \text{const}$ или $V = c$), адиабатный (расширение или сжатие) – идущий без подвода или отвода теплоты ($\Delta Q = 0$, следовательно $\Delta S = 0$ или $S = \text{const}$). Все реальные необратимые процессы – политропные, в той или иной мере приближаются к обратимым.

Из уравнения $\ell_{1-2} = \int_{V_1}^{V_2} P \cdot dv$ следует, что в P-v-диаграмме значение удельной работы (для 1 кг газа) численно равно площади под линией, изображающей термодинамический процесс (рис. 3.2.), т.е. $\ell_{1-2} = F_{a12ba}$.

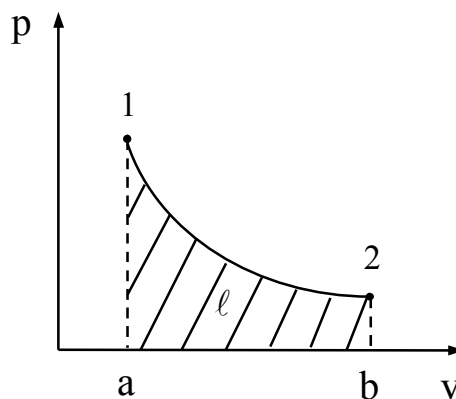


Рис. 3.2. Термодинамический процесс расширения в P-v- диаграмме

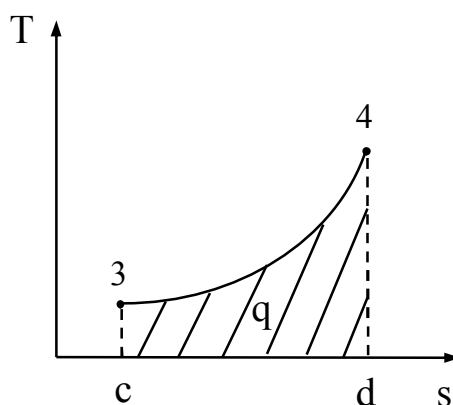


Рис. 3.3. Термодинамический процесс нагрева в T-s- диаграмме

Из уравнения для расчета удельной энтропии выразим теплоту

$$dq = T \cdot ds, \text{ т.е. } q = \int_{s_1}^{s_2} T \cdot ds, \text{ т.е. количество подведенной или отве-}$$

денной теплоты численно равно площади под кривой (рис.3.3.), т.е. $q = F_{c34dc}$.

3.3. Частные случаи первого закона термодинамики

Как было сказано выше, все члены уравнения первого закона термодинамики могут быть больше, меньше или равными нулю. Частными случаями первого начала термодинамики являются процессы, в которых одно из слагаемых уравнения равно 0, т.е. это изобарный, изохорный, изотермический и адиабатный процессы. Рассмотрим, как выглядит уравнение связи параметров идеального газа, выражение первого закона термодинамики, графическое изображение данных процессов в P-v- и T-s-диаграммах, уравнения для расчета теплоты, работы, изменения внутренней энергии, энтальпии и энтропии для частных случаев.

3.3.1. Изотермический процесс (расширение или сжатие)

$$T_1 = T_2 \text{ или } T = \text{const}$$

- **Связь параметров:**

Для начального и конечного состояния запишем уравнение связи параметров 1 кг идеального газа:

$$P_1 v_1 = RT_1 \quad P_2 v_2 = RT_1$$

Разделив одно уравнение на другое, получим:

$$\frac{P_1 v_1}{P_2 v_2} = \frac{RT_1}{RT_1}; \quad P_1 v_1 = P_2 v_2 \quad \text{или} \quad \frac{P_1}{P_2} = \frac{v_2}{v_1}.$$

Последнее выражение является уравнением Бойля – Мариотта.

- ***I закон термодинамики:***

В уравнении первого закона термодинамики для 1 кг вещества $q = \Delta u + \ell$ изменение внутренней энергии $\Delta u = 0$, следовательно, закон принимает следующий вид: $q = \ell$.

- ***P-v- и T-s-диаграммы:***

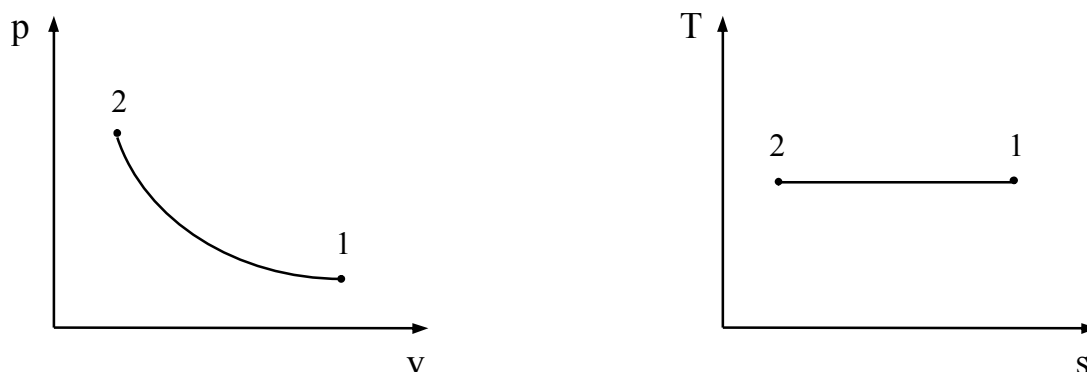


Рис. 3.4. Изотермический процесс в P-v- и T-s- диаграммах:
1 – 2 – сжатие; 2 – 1 – расширение

- ***изменение удельной внутренней энергии:***

$$\Delta u = c_v \cdot (T_2 - T_1) = 0;$$

- ***работа и теплота:***

$$\ell = q = \int_1^2 P \cdot dv = \int_1^2 RT \cdot \frac{dv}{v} = RT \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \cdot \ln \frac{P_1}{P_2} \quad \text{Дж/кг или кДж/кг};$$

- ***изменение энтальпии:*** $\Delta i = 0$;

- ***изменение энтропии:***

$\Delta s = c_v \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + R \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = R \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = R \cdot \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$ Дж/(кг К) или кДж/(кг К), т.к. для $T = \text{const}$ $\ln(T_2/T_1) = 0$, также $v_2/v_1 = P_1/P_2$ по закону Бойля – Мариотта.

3.3.2. Изобарный процесс (нагрев или охлаждение)

$$P_1 = P_2 \text{ или } P = \text{const}$$

- **Связь параметров:**

Для начального и конечного состояния запишем уравнение связи параметров для 1 кг идеального газа:

$$P_1 v_1 = R T_1; \quad P_1 v_2 = R T_2$$

Разделив одно уравнение на другое, получим:

$$\frac{P_1 v_1}{P_1 v_2} = \frac{R T_1}{R T_2}, \quad \frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Последнее выражение является уравнением Гей - Люссака.

- **I закон термодинамики:** $q = \Delta u + \ell$

- **P-v- и T-s-диаграммы:**

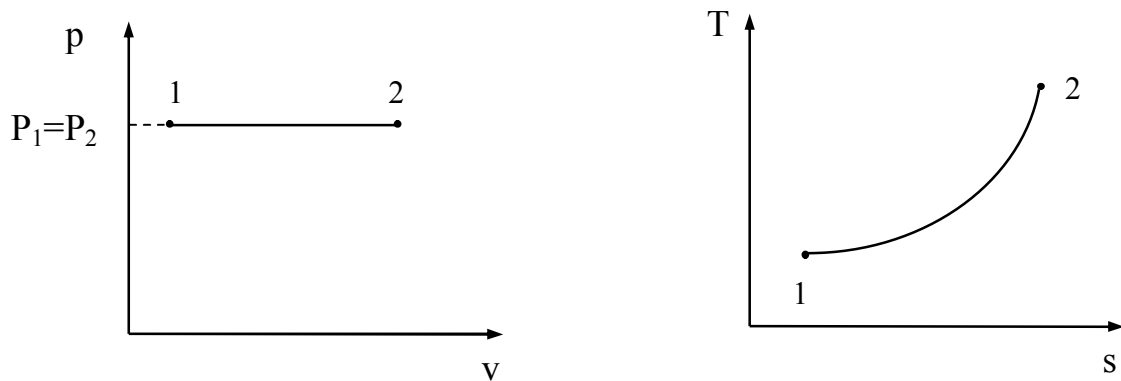


Рис. 3.5. Изобарный процесс в P-v- и T-s- диаграммах:
1 – 2 – нагрев, 2 – 1 – охлаждение

- **изменение удельной внутренней энергии:**

$$\Delta u = c_v \cdot (T_2 - T_1);$$

- **работа:**

$$\ell = \int_1^2 P \cdot dv = P(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1);$$

- **теплота:**

$$q = \Delta u + \ell = c_v(T_2 - T_1) + P(v_2 - v_1) = c_v(T_2 - T_1) + R(T_2 - T_1) = (c_v + R) \cdot (T_2 - T_1) = c_p(T_2 - T_1);$$

изменение энтальпии:

$$\Delta i = c_p \cdot (T_2 - T_1);$$

• **изменение энтропии:**

$$\Delta s = c_p \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = c_p \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right).$$

3.3.3. Изохорный процесс (нагрев или охлаждение)

$$V_1 = V_2 \text{ или } V = \text{const.}$$

• **Связь параметров:**

Для начального и конечного состояния запишем уравнение связи параметров для 1 кг идеального газа:

$$P_1 v_1 = RT_1; \quad P_1 v_2 = RT_2$$

Разделив одно уравнение на другое, получим:

$$\frac{P_1 v_1}{P_2 v_1} = \frac{RT_1}{RT_2} \quad \frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Последнее выражение является уравнением Шарля.

• **I закон термодинамики:**

В уравнении первого закона термодинамики $q = \Delta u + \ell$, т.к. $\ell = 0$, следовательно $q = \Delta u$.

• **P-v- и T-s-диаграммы:**

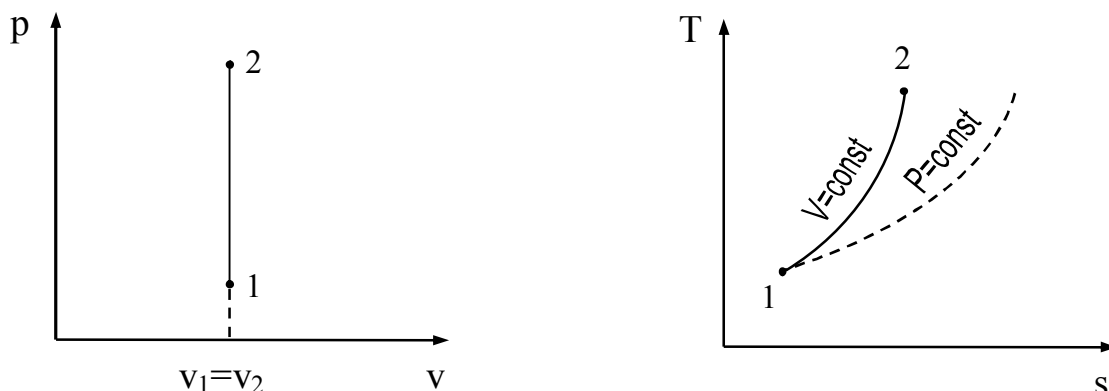


Рис. 3.6. Изохорный процесс в P-v- и T-s- диаграммах:
1 – 2 – нагрев, 2 – 1 – охлаждение

• **изменение удельной внутренней энергии и теплота:**

$$\Delta u = q = c_v \cdot (T_2 - T_1);$$

- **работа:** $\ell = 0$;

- **изменение энтальпии:** $\Delta i = c_p \cdot (T_2 - T_1)$;

- **изменение энтропии:** $\Delta s = c_v \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = c_v \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$.

3.3.4. Адиабатный процесс (расширение и сжатие)

Адиабатный (в переводе с греческого адиабата - непередаваемо) – это процесс расширения или сжатия газа без подвода или отвода теплоты. Примером могут служить процессы расширения или сжатия газа, внутри цилиндра с поршнем, заключенным в термонепроницаемую (термоизоляционную) оболочку, т.е. $\Delta q = 0$ или $\Delta s = 0$ (т.е. $s = \text{const}$).

- **Связь параметров:**

Для начального и конечного состояния уравнение связи параметров для 1 кг идеального газа:

$$P_1 v_1^k = P_2 v_2^k,$$

где k – показатель адиабаты (или коэффициент Пуассона).

Показатель адиабаты $k = \frac{c_p}{c_v}$ зависит от атомности газа:

- для одноатомных газов $k = 1,66$;
- двухатомных - $k = 1,4$;
- трехатомных - $k = 1,33$.

- **I закон термодинамики:**

В уравнении первого закона термодинамики

$q = \Delta u + \ell$, но т.к. $q = 0$, следовательно $\Delta u = -\ell$ или $-\Delta u = \ell$, т.е. изменение внутренней энергии численно равно работе с противоположным знаком.

- **P-v- и T-s-диаграммы:**

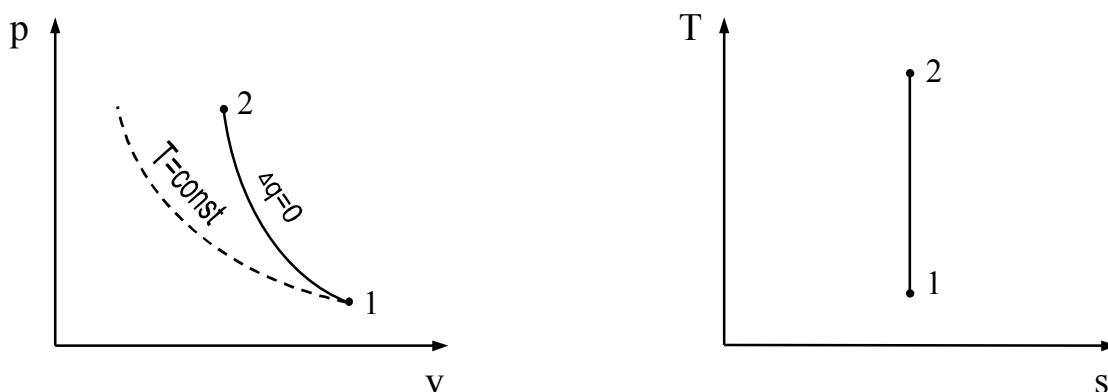


Рис. 3.7. Адиабатный процесс в P-v- и T-s- диаграммах:
1 – 2 – сжатие, 2 – 1 – расширение

- **изменение удельной внутренней энергии и теплота:**

$$\Delta u = c_v \cdot (T_2 - T_1);$$

- **работа:**

$$\ell = \frac{1}{k-1} (P_1 v_1 - P_2 v_2) = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2);$$

- **изменение энтальпии:**

$$\Delta i = c_p \cdot (T_2 - T_1);$$

- **изменение энтропии:**

$$\Delta s = 0.$$

3.3.5. Политропный процесс (расширение и сжатие, нагрев и охлаждение)

Все реальные необратимые процессы – политропные, т.е. проходят с изменением всех параметров системы: температуры, давления и объема газа (пара).

- **Связь параметров:**

Для начального и конечного состояния уравнение связи параметров для 1 кг идеального газа:

$$P_1 v_1^n = P_2 v_2^n,$$

где n – показатель политропы, который может принимать любые численные значения, т.е. $-\infty < n < +\infty$.

Идеальные процессы (изотермический, изобарный, изохорный и адиабатный) являются частными случаями политропы, показатель

политропы для каждого частного случая принимает следующий вид:

- изотермического процесса $n = 1$;
- изобарного $n = 0$;
- изохорного $n = \pm \infty$;
- адиабатного $n = k$.

• ***I закон термодинамики:***

В уравнении первого закона термодинамики $q = \Delta u + \ell$.

• ***P-v- и T-s-диаграммы:***

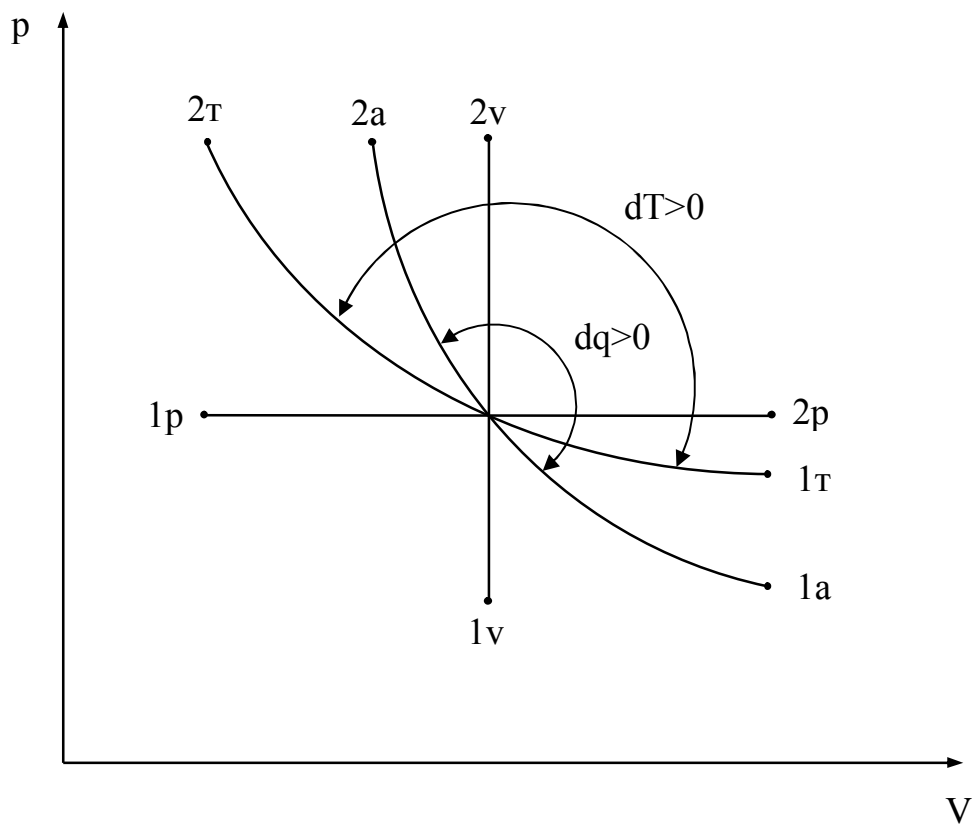


Рис.3.8. Изображение термодинамических процессов в P-v-диаграмме

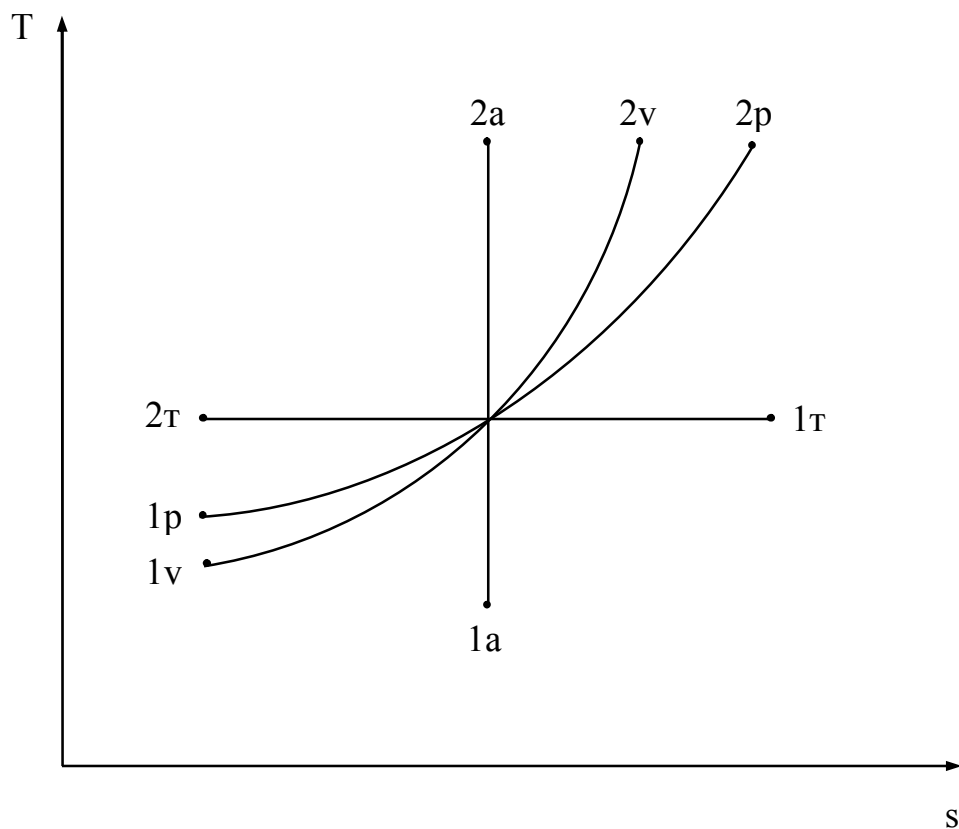


Рис.3.9. Изображение термодинамических процессов в T-s-диаграмме

1T - 2T - изотермическое сжатие (уменьшение объема, увеличение давления);

2T - 1T - изотермическое расширение (увеличение объема, снижение давления);

1p - 2p - изобарный нагрев (повышение температуры, увеличение объема);

2p - 1p - изобарное охлаждение (уменьшение температуры, уменьшение объема);

1v - 2v - изохорный нагрев (увеличение температуры, увеличение давления);

2v - 1v - изохорное охлаждение (снижение температуры, уменьшение давления);

1a - 2a - адиабатное сжатие (уменьшение объема, увеличение давления, вследствие этого увеличение температуры);

2a - 1a - адиабатное расширение (увеличение объема, снижение давления, вследствие этого снижение температуры).

Политропные процессы занимают промежуточное положение между идеальными процессами изобарой, изохорой, изотермой и адиабатой.

- *изменение удельной внутренней энергии и теплота:*

$$\Delta u = c_v \cdot (T_2 - T_1);$$

- *работа:* $\ell = \frac{1}{n-1} (P_1 v_1 - P_2 v_2) = \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2);$

- *изменение энтальпии:* $\Delta i = c_p \cdot (T_2 - T_1);$

- *изменение энтропии:* $\Delta s = c_v \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + R \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right).$

Реальные термодинамические процессы, имеющие место в практической деятельности и технологических процессах, являются политропными. Однако часто при расчетах процессы представляют как идеальные (изобарные, адиабатные и т.д.).

В процессах нагрева или охлаждения рассчитывают теплоту. Как известно (см. раздел 2.2.) при изобарном нагреве (охлаждении) количество подводимой (или отводимой) теплоты больше, чем в изохорном процессе, т.е. $Q_p > Q_v$. Поэтому реальные процессы нагрева или охлаждения газов, паров, жидкостей, когда веществу дана возможность свободно расширяться (при охлаждении сжиматься, например, газ внутри цилиндра с подвижным поршнем) рассчитывают как изобарные, т.е. наиболее энергоемкие процессы.

Процессы сжатия газов и паров рассчитывают как адиабатные, идущие быстро во времени и требующие максимальной работы, затраченной на сжатие.

Глава 4. Второй закон термодинамики.

Круговые термодинамические процессы

4.1. Второй закон термодинамики

Естественные термодинамические процессы всегда направлены в сторону достижения системой равновесного состояния (механического, термического или любого другого). Это явление отражено вторым законом термодинамики, имеющим большое значение для анализа работы теплоэнергетических машин. В соответствии с этим законом, теплота самопроизвольно может переходить от тела с большей температурой (горячего) к телу с меньшей температурой (холодному). Осуществление обратного переноса теплоты от холодного тела к горячему связано с затратами работы, т.е. данные процессы требуют затрат механической и электрической энергии (например, работа холодильной машины).

Второй закон в технической термодинамике устанавливает, что в прямом цикле подведенная к рабочему телу теплота q_1 только частично переходит в работу $\ell_{\text{пол}}$, часть тепловой энергии q_2 не может быть переведена в работу, т.е. $q_2 \neq 0$.

$$q_1 = \ell_{\text{пол}} + q_2, \quad (4.1)$$

где q_1 – подводимая теплота; $\ell_{\text{пол}}$ – полезная работа; q_2 – отводимая теплота.

При подводе к рабочему телу теплоты q_1 газ (пар) расширяется, совершает работу против внешних сил $\ell_{\text{расш}}$. При достижении системой равновесия с окружающей средой по температуре и давлению получение работы прекращается. Чтобы рабочее тело вновь могло совершать работу, его необходимо вернуть в исходное состояние, т.е. повысить давление и увеличить температуру, затрачивая внешнюю работу $\ell_{\text{сж}}$ и отводя теплоту q_2 .

Последовательно идущие термодинамические процессы, в которых рабочее тело совершает работу, а затем возвращается в исходное состояние, чтобы вновь совершать работу, называются круговыми процессами или циклами.

Вернуть рабочее тело в исходное состояние можно несколькими путями рис. 4.1. Если 1 – а – 2 – процесс расширения, то вернуть газ из состояния 2 в состояние 1 можно следующими путями:

- 2 – а – 1 – кривая сжатия совпадает с кривой процесса расширения, в данном случае затраты работы на сжатие $\ell_{\text{сж}} = \ell_{2-a-1}$ равны работе, полученной при расширении $\ell_{\text{расш}} = \ell_{1-a-2}$:

$$\ell_{2-a-1} = \ell_{1-a-2} = F_{32a14} \quad \text{или} \quad \ell_{\text{сж}} = \ell_{\text{расш}}.$$

Полезная работа данного цикла $\ell_{\text{пол}} = \ell_{\text{расш}} - \ell_{\text{сж}} = F_{41a23} - F_{32a14} = 0$, следовательно КПД такого цикла $\eta = 0$.

- 2 – b – 1 – кривая сжатия расположена выше кривой расширения. В данном случае работа, затраченная на сжатие $\ell_{\text{сж}} = \ell_{2-b-1} = F_{32b14}$, больше работы расширения $\ell_{\text{расш}} = \ell_{1-b-2} = F_{31b24}$. Полезная работа в этом случае $\ell_{\text{пол}} = \ell_{\text{расш}} - \ell_{\text{сж}} = (F_{41a23} - F_{32b14}) < 0$, т.е. затрачивается работы больше, чем получается при расширении, следовательно КПД такого цикла $\eta < 0$.
- 2 – c – 1 – кривая сжатия расположена ниже линии расширения. Работа, затраченная на сжатие $\ell_{\text{сж}} = \ell_{2-c-1} = F_{32c14}$, меньше работы расширения $\ell_{\text{расш}} = \ell_{2-a-1} = F_{41a23}$. Полезная работа $\ell_{\text{пол}} = \ell_{\text{расш}} - \ell_{\text{сж}} = (F_{41a23} - F_{32c14}) > 0$, следовательно КПД данного цикла $\eta > 0$.

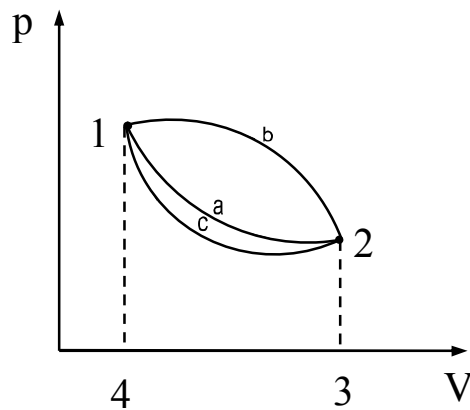


Рис. 4.1. P-v-диаграмма. Прямые и обратные циклы: линии 1-a-2 - расширение, 2-a-1- сжатие; 1-b-2 - сжатие, 1-c-2 – сжатие

Циклы, в которых полезная работа $\ell_{\text{пол}} > 0$, считают прямыми циклами (цикл 1 – а – 2 – с - 1). По прямому циклу работают все тепловые двигатели, назначение которых – получение максимально возможной полезной работы расширения. Эффективность работы данного цикла оценивается термическим КПД, который показывает, какое количество полезной работы $\ell_{\text{пол}}$ получено на единицу затраченной теплоты q_1 :

$$\eta_t = \frac{\ell_{\text{пол}}}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1}, \quad (4.2)$$

где η_t – термический КПД; $\ell_{\text{пол}}$ – полезная работа; q_1 – подводимая теплота; q_2 – отводимая теплота.

Из второго закона термодинамики следует, что если $q_2 \neq 0$, следовательно термический КПД $\eta_t < 1$.

Циклы, в которых $\ell_{\text{пол}} < 0$ (1 – а – 2 – b - 1), считают обратными.

По обратному циклу работают холодильные машины, получение «холода» в которых связано с затратами работы. Эффективность работы таких циклов оценивается холодильным коэффициентом, который показывает, какое количество «холода» q_2 получено на единицу затраченной работы ℓ , следовательно:

$$\varepsilon = \frac{q_2}{\ell}, \quad (4.3)$$

где ε – холодильный коэффициент, q_2 – отводимая теплота; ℓ - работа, затраченная на сжатие.

Т.к. $q_2 > \ell$, согласно II закону термодинамики, следовательно, холодильный коэффициент $\varepsilon > 1$.

4.2. Цикл Карно

Второй закон термодинамики ставит предел экономичности превращения тепловой энергии в механическую в тепловом двигателе. Вопрос о том, какая часть тепловой энергии максимально может быть переведена в работу, был решен французским ученым Сади Карно, который рассмотрел простейший идеальный цикл, состоящий из идеальных адиабатных и изотермических процессов расширения и сжатия, и определил его КПД.

Эффективность цикла, состоящего из необратимых процессов, сравнивается с идеальным циклом, состоящим из обратимых процессов:

$$\eta = \frac{\eta_{\text{цикла}}}{\eta_{\text{К}}}, \quad (4.4)$$

где η – КПД цикла; $\eta_{\text{цикла}}$ – КПД данного цикла; $\eta_{\text{К}}$ – КПД цикла Карно.

Карно расположил рабочее тело (газ) между источником (И) и приемником теплоты или холодильником (Х). Источник теплоты имеет температуру выше, а приемник – ниже температуры системы.

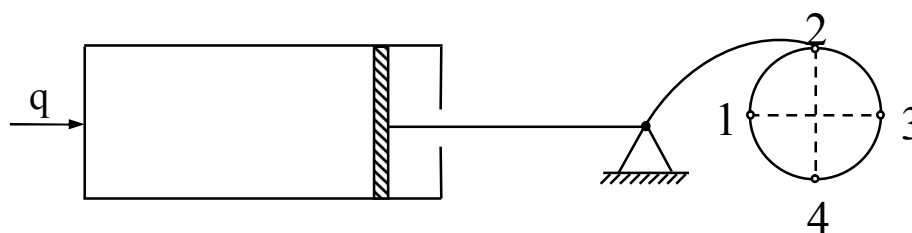


Рис. 4.2. Схема: цилиндр с поршнем и подвод теплоты для прямого цикла Карно

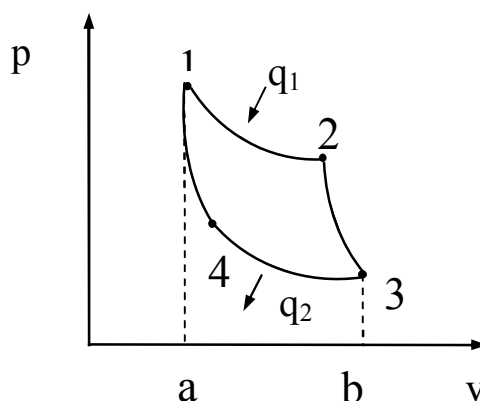


Рис. 4.3. Прямой цикл Карно в P-v-диаграмме

При подводе теплоты от источника к термодинамической системе газ расширяется, совершает работу – процесс 1 – 2. В т.2. система отключается от источника теплоты, и расширение происходит адиабатно – процесс 2 - 3 за счет внутренних резервов системы. В т.3 подключается холодильник, и теплота от системы отводится, однако сжатие проходит по изотерме – процесс 3 – 4, далее в т.4. отключается холодильник, и сжатие идет по адиабате - без отвода теплоты – процесс 4 - 1. Таким образом, рабочее тело возвращается в исходное состояние и вновь может совершать работу.

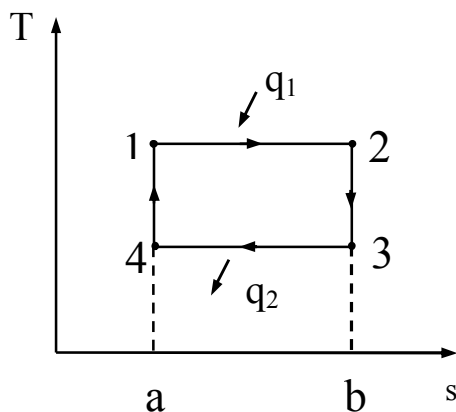


Рис. 4.4. Прямой цикл Карно в T-s-диаграмме

Термодинамические процессы, составляющие цикл Карно:

1 – 2 – изотермическое расширение за счет подвода теплоты q_1 от источника (И). Согласно I закону термодинамики: $\Delta q = \ell$, т.к. $\Delta u = 0$.

2 – 3 – адиабатное расширение за счет изменения внутренней энергии газа. $\Delta q = 0$, следовательно - $\Delta u = \ell$.

3 – 4 – изотермическое сжатие за счет теплообмена с холодильником (Х), т.к. $\Delta u = 0$, - $\Delta q = - \ell$.

4 – 1 – адиабатное сжатие за счет увеличения внутренней энергии газа, $\Delta q = 0$, $\Delta u = - \ell$.

Термический КПД прямого цикла Карно η_t^K , с учетом уравнений для расчета подводимой q_1 и отводимой теплоты q_2 , можно выразить через температурный интервал цикла, приняв изохорную теплоемкость постоянной:

$$q_1 = T_1 \cdot (s_2 - s_1), \quad (4.5)$$

$$q_2 = T_3 \cdot (s_3 - s_4), \quad s_3 = s_2; \quad s_4 = s_1 \quad (4.6),$$

$$\eta_t^K = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_3}{T_1} = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}}, \quad (4.7)$$

где η_t^K – КПД цикла Карно, T_{\min} – минимальная температура газа (в точке 3), К; T_{\max} – максимальная температура газа (в точке 1).

Из уравнения (4.7) следует, что термический КПД цикла Карно $\eta_t^K < 1$, т.к. $\eta_t^K = 1$ при $\frac{T_3}{T_1} = 0$, а это возможно при $T_3 = 0$ (абсолютный ноль температуры недостижим) или при $T_1 = + \infty$, что невозможно.

Идеальный цикл Карно в заданном интервале температур имеет максимальный КПД, поэтому служит эталоном для оценки термодинамической эффективности цикла и показывает пути усовершенствования процессов в рамках второго закона термодинамики.

4.3. Циклы газотурбинных установок (ГТУ)

Схема газотурбинной установки представлена на рис.4.5.

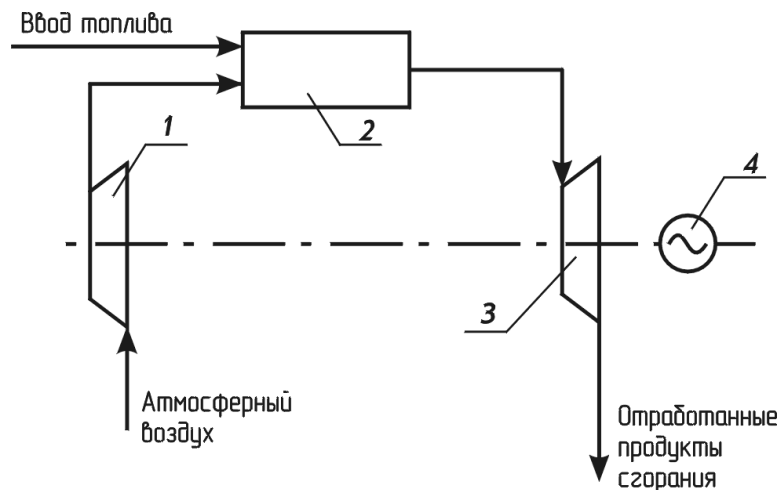


Рис. 4.5. Принципиальная схема ГТУ:

- | | |
|------------------------------|----------------------|
| 1 – воздуходувка; | 3 – газовая турбина; |
| 2 – камера сгорания топлива; | 4 – электрогенератор |

Газотурбинная установка (ГТУ) представляет собой тепловой двигатель. Установка состоит из газодувки (или компрессора), камеры сгорания топлива и газовой турбины и электрогенератора. Принцип работы такой установки следующий: холодный воздух сжимается в компрессоре 1 и подается в камеру сгорания 2. В нее же подается необходимое количество топлива. Образовавшиеся продукты сгорания заданной температуры направляются в газовую турбину 3. Адиабатно расширяясь в турбине, температура продуктов сгорания снижается, отработанные топочные газы выбрасываются наружу. Выработанная в турбине механическая энергия в электрогенераторе 4 превращается в электрическую.

В зависимости от характера процесса горения топлива в камере сгорания все циклы ГТУ разделяются на два типа: горением при постоянном давлении ($P = \text{const}$) и горением при постоянном объеме ($V = \text{const}$). На рис.4.6 и 4.7 представлены идеальные циклы ГТУ в $P-v$ – и $T-s$ – диаграммах с подводом теплоты при $P = \text{const}$ и при $V = \text{const}$. При построении идеального цикла как $P-v$ – так и в $T-s$ - диаграммах, условно принимают в качестве рабочего тела идеальный газ, который в процессе горения не участвует и своего состава на протяжении всего цикла не меняет.

Рассмотрим цикл с подводом тепла при $P = \text{const}$.

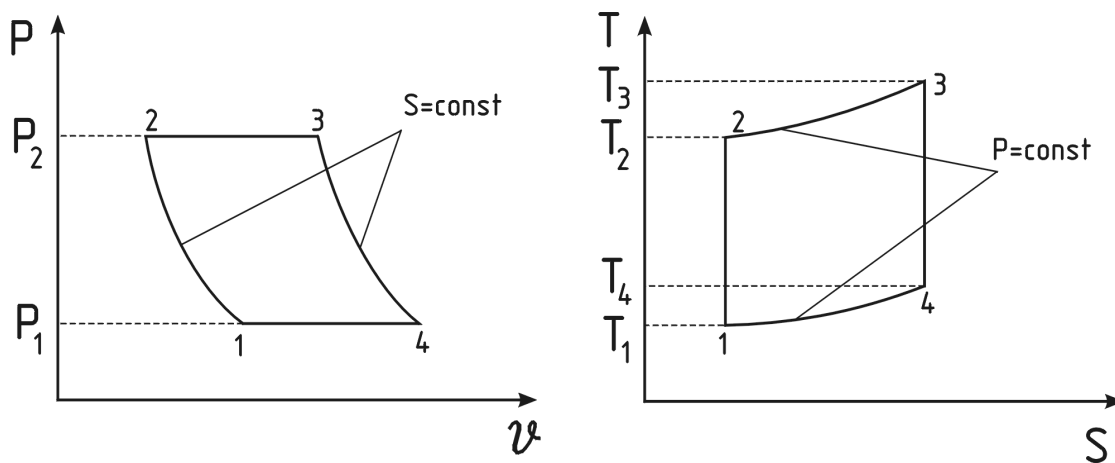


Рис. 4.6. Цикл ГТУ с подводом теплоты при $P = \text{const}$ в $P-v$ – и $T-s$ – диаграммах

Запишем уравнения идеального газа для процессов цикла и выразим температуры газа в т.2,3,4:

$$\text{для адиабаты 1-2: } \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad (4.8)$$

$$\text{для изобары 2-3: } \frac{T_3}{T_2} = \left(\frac{V_3}{V_2}\right), \quad T_3 = T_2 \left(\frac{V_3}{V_2}\right), \quad (4.9)$$

$$\text{для адиабаты 3-4: } \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad T_4 = T_3 \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{k-1}{k}} = T_3 \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (4.10)$$

Количество подведенной q_1 и отведенной теплоты q_2 можно представить уравнениями:

$$q_1 = C_p (T_3 - T_2), \quad (4.11)$$

$$q_2 = C_p (T_4 - T_1). \quad (4.12)$$

Термический КПД цикла ГТУ:

$$\eta_t = \ell_{ц} / q_1 = 1 - 1(q_2/q_1) = 1 - [(T_4 - T_1)/(T_3 - T_2)]$$

$$\text{или } \eta_t = 1 - \frac{1}{\lambda^{\frac{k-1}{k}}}, \quad (4.13)$$

где λ – степень повышения давления в компрессоре ($\lambda = P_2/P_1$).

Полезную работу цикла $\ell_{ц}$ можно определить как разность работы расширения и сжатия: $\ell_{ц} = \ell_{пол} = \ell_{расш} - \ell_{сж}$.

Работа сжатия:

$$\ell_{сж} = P_1(v_4 - v_1) + (1/(k-1))(P_2v_2 - P_1v_1), \quad (4.14)$$

Работа расширения:

$$\ell_{расш} = P_2(v_3 - v_2) + \frac{1}{k-1} (P_3v_3 - P_4v_4). \quad (4.15)$$

Рассмотрим цикл с подводом тепла при $V = \text{const}$.

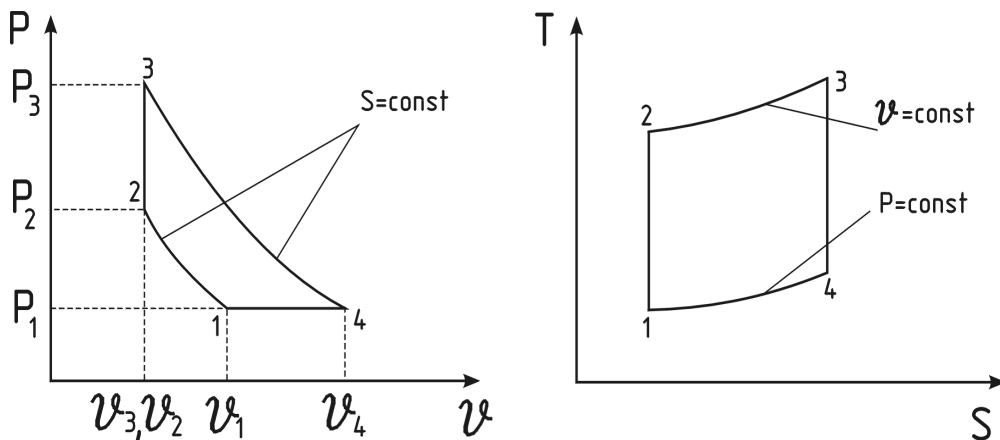


Рис. 4.7. Цикл ГТУ с подводом теплоты при $V = \text{const}$ в $P-v$ – и $T-s$ – диаграммах

Для цикла ГТУ с изохорным подводом теплоты:
для адиабаты 1 – 2

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = (\lambda)^{\frac{k-1}{k}}, \rightarrow T_2 = T_1 (\lambda)^{\frac{k-1}{k}}, \quad (4.16)$$

где λ – степень повышения давления в компрессоре;
для изохоры 2 – 3

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{P_3}{P_2} = \lambda', \rightarrow T_3 = T_2 \lambda', \quad (4.17)$$

где λ' - степень дополнительного повышения давления при изохорном нагреве;
для адиабаты 3 – 4

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \rightarrow T_4 = T_3 \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (4.18)$$

Количество подведенной теплоты:

$$q_1 = C_v (T_3 - T_2). \quad (4.19)$$

Количество отводимой теплоты:

$$q_2 = C_p (T_4 - T_1). \quad (4.20)$$

Термический КПД цикла ГТУ:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{k(T_4 - T_1)}{T_3 - T_2} = \frac{\ell_{ц}}{q_1}. \quad (4.21)$$

Работа цикла:

$$\begin{aligned} \ell_{ц} &= \ell_{расш} - \ell_{сж} = \\ &= \frac{1}{k-1} (P_3 v_3 - P_4 v_4) - \left[P_1 (v_4 - v_1) + \frac{1}{k-1} (P_2 v_2 - P_1 v_1) \right]. \end{aligned} \quad (4.22)$$

4.4. Циклы двигателей внутреннего сгорания (ДВС)

Поршневым двигателем внутреннего сгорания называют тепловой двигатель, основным элементом которого является цилиндр с поршнем. Сгорание топлива происходит внутри цилиндра в среде сжатого воздуха. Образовавшиеся продукты сгорания перемещают поршень, от которого выработанная механическая энергия передается на вал двигателя с помощью кривошипно-шатунного механизма. При обратном движении поршня происходит сжатие чистого воздуха или рабочей смеси, что повышает их температуру и ускоряет процесс горения.

Двигатели внутреннего сгорания широко используются в современной технике, особенно в транспортных силовых установках (автомобили, самолеты, речные и морские суда, тепловозы).

По способу зажигания топлива в цилиндре двигателя разделяют на две группы: двигатели с воспламенением от искры, двигатели с воспламенением от сжатия. Все двигатели внутреннего сгорания изготавливают двухтактными или четырехтактными. В первом случае все процессы в двигателе: сжатие смеси, горение топлива, расширение продуктов сгорания и выхлоп отработанных газов происходят за два рабочих хода поршня (один оборот вала). Во втором случае все процессы производятся за четыре хода поршня.

Термодинамические циклы, по которым работают двух- и четырехтактные двигатели, одинаковы, поскольку на них не сказываются взаимно компенсирующиеся процессы

всасывания и выталкивания остаточных газов. Для удобства термодинамического исследования ДВС в качестве идеального образца условно принимается обратимый цикл, состоящий из двух адиабат и двух изохор (цикл Отто).

4.4.1. Цикл с изохорным подводом теплоты (цикл Отто)

Рассмотрим цикл Отто, изображенный в P-v- и T-s- диаграммах на рис.4.8.

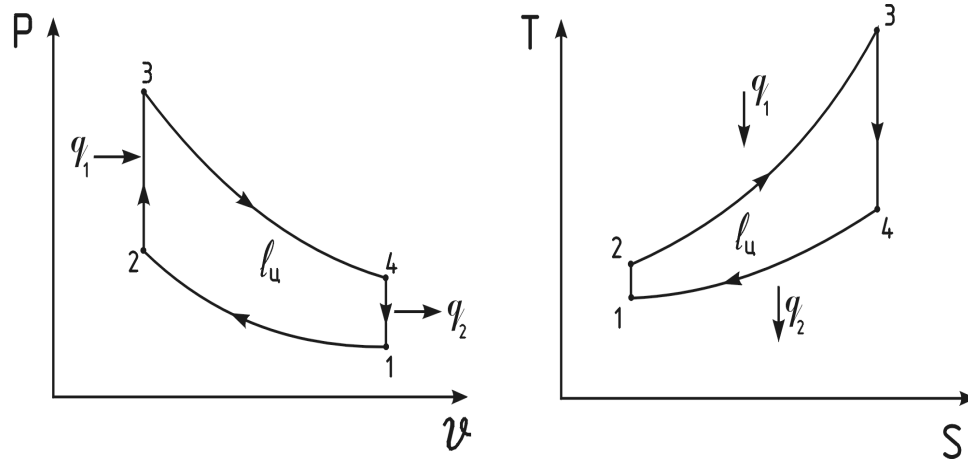


Рис. 4.8. Цикл Отто в P-v- и T-s- диаграммах

Процесс 1-2- адиабатное сжатие рабочего тела; процесс 2-3 – подвод теплоты $[q_1 = C_v(T_3 - T_2)]$ к рабочему телу от горячего источника; процесс 3-4 - адиабатное расширение; процесс 4 - 1- отвод теплоты $[q_2 = C_v(T_4 - T_1)]$ к холодному источнику. Площадь 1-2-3-4-1 равна удельной работе цикла: $[l_u = q_1 - q_2]$.

С другой стороны, теоретическая полезная работа, которую производит 1 кг рабочего тела за цикл, равна разности работ расширения и сжатия:

$$l_u = l_{\text{расш}} - l_{\text{сж}} = \frac{1}{k-1}(P_3 v_3 - P_4 v_4) - \frac{1}{k-1}(P_2 v_2 - P_1 v_1) \quad (4.23)$$

или

$$l_u = \frac{RT_1}{k-1}(\varepsilon^{k-1} - 1)(\lambda - 1). \quad (4.24)$$

Термический КПД цикла Отто:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_v(T_3 - T_2)}. \quad (4.25)$$

Если обозначить степень сжатия $\varepsilon = v_1 / v_2$, а степень повышения давления $\lambda = p_1 / p_2$, то можно записать:

$$\begin{aligned} \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4} = \varepsilon^k, \\ \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} = \frac{T_3 - T_2}{T_4 - T_1} = \varepsilon^{k-1}, \\ T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1}, \end{aligned} \quad (4.26)$$

$$T_3 = T_1 \cdot \lambda \cdot \varepsilon^{k-1},$$

$$T_4 = T_1 \cdot \lambda,$$

где k – показатель адиабаты.

Тогда после подстановки в выражение (68) получаем:

$$\eta_t = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}. \quad (4.27)$$

Из последней формулы видно, что КПД цикла Отто повышается с увеличением степени сжатия и показателя адиабаты k . Степень сжатия в двигателе Отто обычно составляет: для бензиновых – 4-7, для газовых 6-7, для авиационных двигателей 8-9, т.е. по такому циклу работают карбюраторные двигатели, использующие бензин, лигроин, бензол, нефтяной, генераторный и коксовый газ. Такие двигатели получили широкое распространение как быстроходные двигатели для легковых автомобилей, самолетов, катеров и т.д.

Термический КПД этой группы двигателей 40-55%, а эффективный КПД 25-35%.

4.4.2. Цикл с изобарным подводом теплоты (цикл Дизеля)

Обратимый цикл Дизеля в P-v- и T-s- диаграммах изображен на рис.4.9.

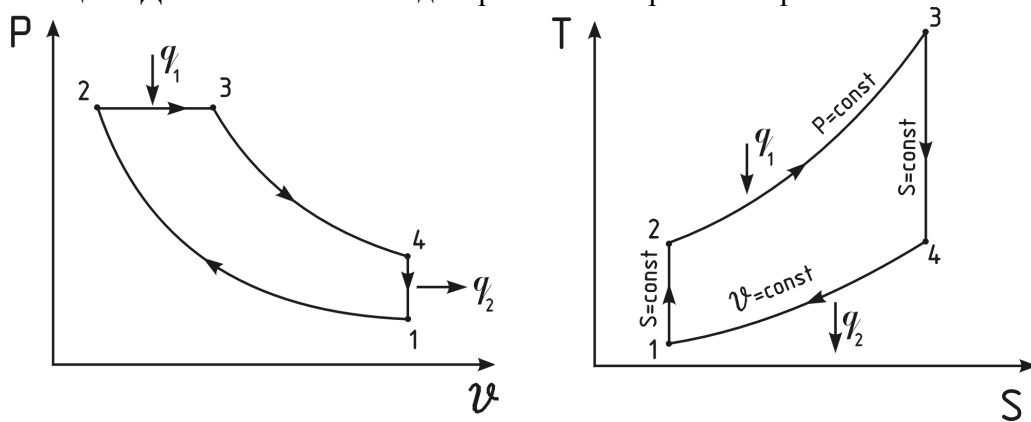


Рис. 4.9. Цикл Дизеля в P-v- и T-s- диаграммах

Этот цикл является образцом компрессорного двигателя с воспламенением горючего от сжатия. В этом типе двигателя жидкое горючее распыляется через форсунку сжатым воздухом, подготовленным в специальном компрессоре.

Цикл осуществляется следующим образом. Рабочее тело сжимается по адиабате 1 - 2; в изобарном процессе 2 - 3 рабочему телу сообщается теплота [$q_1 = C_p(T_3 - T_2)$], затем оно расширяется по адиабате 3 - 4. В изохорном процессе 4 - 1 от рабочего тела отводится теплота [$q_2 = C_v(T_4 - T_1)$], и оно возвращается в первоначальное состояние.

Термический КПД цикла:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)}. \quad (4.28)$$

Обозначим степень предварительного (изобарного) расширения $\rho = v_3/v_2$, тогда согласно уравнениям процессов идеальных газов можно записать:

- для адиабаты 1 - 2

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}; \quad (4.29)$$

- для изобары 2 - 3

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{v_3}{v_2} = \rho; \quad (4.30)$$

- для изохоры 4 - 1

$$\frac{T_4}{T_1} = \rho^k. \quad (4.31)$$

Выражая значение всех температур через T_1 и подставляя эти выражения в (4.24), получим:

$$\eta_t = 1 - \frac{\rho^k - 1}{K \cdot \varepsilon^{k-1} \cdot (\rho - 1)}. \quad (4.32)$$

Как видно из последней формулы, увеличение степени предварительного расширения ρ уменьшает, а увеличение степени сжатия ε и показателя адиабаты k повышает значение термического КПД цикла.

Теоретическая полезная работа цикла $\ell_{ц}$, которую производит 1 кг рабочего тела, равна разности работ расширения и сжатия:

$$\ell_{ц} = \ell_{расш} - \ell_{сж} = P_2(v_3 - v_2) + \frac{1}{k-1}(P_3v_3 - P_4v_4) - \frac{1}{k-1}(P_2v_2 - P_1v_1). \quad (4.33)$$

4.4.3. Цикл со смешанным подводом теплоты (цикл Тринклера)

Этот цикл является примером бескомпрессорного цикла ДВС с самовоспламенением топлива. При термодинамическом исследовании работы такого двигателя в качестве идеального образца принимается обратимый цикл с подводом рабочего тела в двух процессах при постоянном объеме и постоянном давлении. Этот цикл называют циклом Тринклера. На рис 4.10 представлено изображение такого цикла в P-v- и T-s- диаграммах.

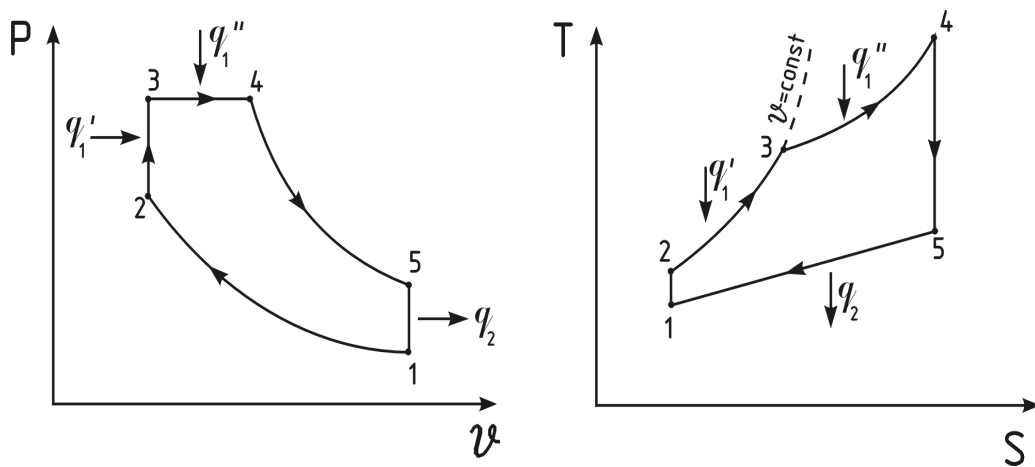


Рис. 4.10. Цикл со смешанным подводом теплоты (цикл Тринклера)

Используя применяемые в предыдущих циклах обозначения, запишем основные характеристики цикла: коэффициент изохорного повышения давления $\lambda = P_3/P_2$; коэффициент предварительного (изобарного) расширения $\rho = v_4/v_3$; степень сжатия $\varepsilon = v_1/v_2$.

Термический КПД смешанного цикла:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1' + q_1''} = 1 - \frac{c_v(T_5 - T_1)}{c_v(T_3 - T_2) + c_p(T_4 - T_3)} \quad (4.34)$$

или

$$\eta_t = 1 - \frac{\frac{T_5}{T_1} - 1}{\frac{T_3 - T_2}{T_1} + k \left(\frac{T_4 - T_3}{T_1} \right)}, \quad (4.35)$$

где

$$\frac{T_2}{T_1} = \varepsilon^{k-1}; \quad \frac{T_3}{T_1} = \varepsilon^{k-1} \cdot \lambda; \quad \frac{T_4}{T_1} = \lambda \cdot \rho \cdot \varepsilon^{k-1}; \quad \frac{T_5}{T_1} = \lambda \cdot \rho^k. \quad (4.36)$$

Тогда выражение для КПД цикла можно записать:

$$\eta_t = 1 - \frac{\lambda \cdot \rho^k - 1}{\varepsilon^{k-1} [\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)]}. \quad (4.37)$$

Из последней формулы следует, что КПД цикла Тринклера увеличивается с ростом степени сжатия ε и уменьшается с увеличением степени изобарного расширения ρ . Причем, чем больше λ , тем меньше ρ (при тех же q_2 и ε).

Из уравнения (4.37) можно получить выражение термического КПД для предыдущих циклов:

- при $\rho = 1 \rightarrow \eta_t = 1 - \frac{\lambda - 1}{\varepsilon^{k-1}(\lambda - 1)} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$, что соответствует циклу Отто.
- при $\lambda = 1, \rightarrow \eta_t = 1 - \frac{\rho^k - 1}{\varepsilon^{k-1}k(\rho - 1)}$, что соответствует циклу Дизеля.

Работа цикла Тринклера:

$$\ell_{ц} = q_1' + q_2'' - q_2 = c_v(T_3 - T_2) + c_p(T_4 - T_3) - c_v(T_5 - T_1). \quad (4.38)$$

В двигателях этого типа $\varepsilon = 14 - 22$, что обеспечивает более высокий термический КПД, $\eta_t = 45 \div 60\%$ и эффективный КПД $\eta_{\text{э}} = 35 \div 42\%$.

Высокая экономичность этих двигателей (Дизеля и Тринклера), работающих на тяжелых сортах жидкого топлива, обуславливает их широкое использование в качестве силовых установок для морских и речных судов, тепловозов, грузовых автомобилей, тракторов и др.

Глава 5. Изменение состояния газов при перемещении

5.1. Истечение газов. I закон термодинамики для потока

В технике имеется большая группа машин, в которых работа производится за счет внешней кинетической энергии рабочего тела – это газовые и паровые турбины, реактивные и ракетные двигатели и т.д. В данном случае имеем дело с открытыми термодинамическими системами, в которых происходит обмен с окружающей средой не только теплотой и работой, но и веществом.

Первый закон термодинамики для потока записывается следующим образом:

$$dq = du + d\ell' + \frac{dw^2}{2}, \quad (5.1)$$

где dq – теплота, подведенная от внешнего источника; du – изменение внутренней энергии газа; $d\ell'$ – работа против внешних сил (работа проталкивания, она не равна работе расширения); $dw^2/2$ – изменение внешней кинетической энергии (располагаемая работа).

Изменение кинетической энергии рабочего тела может происходить как в трубах постоянного, так и в спрофилированных каналах переменного сечения.

Специально спрофилированные каналы, служащие для разгона рабочей среды и придания потоку определенного направления, называют соплами (единственное число - *соплó*). В таком канале (сопле) при перемещении газа происходит расширение (снижение давления) при увеличении скорости (рис. 5.1).

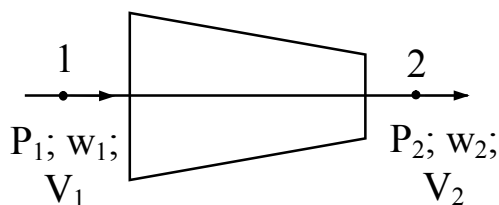


Рис. 5.1. Изменение параметров газа при прохождении через сопло:
P – давление, V – объем, w – скорость газа

Каналы, предназначенные для торможения потока и повышения давления, называются диффузорами (единственное число - *диффузор*).

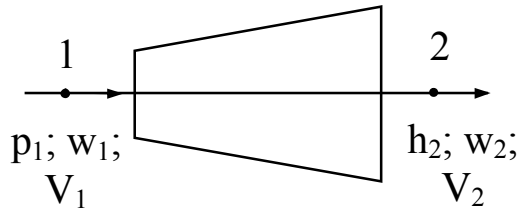


Рис. 5.2. Изменение параметров газа при прохождении через диффузор: P – давление, V – объем, w – скорость газа

Рассмотрим составные части I закона термодинамики для потока:

- работа проталкивания: $\ell' = P_2 v_2 - P_1 v_1$, (5.2)

- изменение внутренней энергии: $\Delta u = u_2 - u_1$, (5.3)

$$\Delta q = u_2 - u_1 + P_2 v_2 - P_1 v_1 + (w_2^2 - w_1^2)/2. \quad (5.4)$$

По определению энтальпии запишем:

$$i = u + Pv, \quad (5.6)$$

$$\Delta q = i_2 - i_1 + (w_2^2 - w_1^2)/2. \quad (5.7)$$

Так как длина канала невелика, а скорость течения среды в них достаточно высокая, то теплообменом между рабочим телом и окружающей средой можно пренебречь, т.е. можно считать процесс истечения адиабатным: $\Delta q = 0$.

Поэтому:

$$i_2 - i_1 + (w_2^2 - w_1^2)/2 = 0 \quad (5.8)$$

или

$$(w_2^2 - w_1^2)/2 = i_1 - i_2. \quad (5.9)$$

Следовательно, изменение внешней кинетической энергии рабочего тела ($w^2/2$) происходит за счет уменьшения энтальпии газа ($i_1 - i_2$).

Для случая истечения из сопла конечная скорость газа значительно выше первоначальной, т.е. $w_2 \gg w_1$, тогда уравнение первого закона термодинамики для потока будет иметь вид:

$$i_1 - i_2 = w_2^2 / 2.$$

Скорость истечения газа из сопла:

$$w_{\text{ист}} = \sqrt{2 \cdot (i_1 - i_2)}. \quad (5.10)$$

Решая совместно уравнения скорости истечения, расхода, предполагаемой работы для адиабатного процесса, запишем уравнение для расчета расхода газа (дается без вывода):

$$G = f \cdot \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{P_1}{v_1}} \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right], \quad (5.11)$$

где G – массовый расход, кг/с; f – площадь поперечного сечения сопла на выходе (устье канала), m^2 ; P_1, P_2 – начальное и конечное давление газа, соответственно, Па; v_1 – начальный объем газа, m^3 ; k – показатель адиабаты (для воздуха и всех двухатомных газов $k = 1,4$).

Анализируя уравнение (5.11), можно сделать вывод, что массовый расход зависит от поперечного сечения устья канала – f , начальных параметров газа – P_1 и v_1 , степени снижения давления – P_2/P_1 .

На рис. (5.3) дана теоретическая и практическая зависимость расхода от степени уменьшения давления.

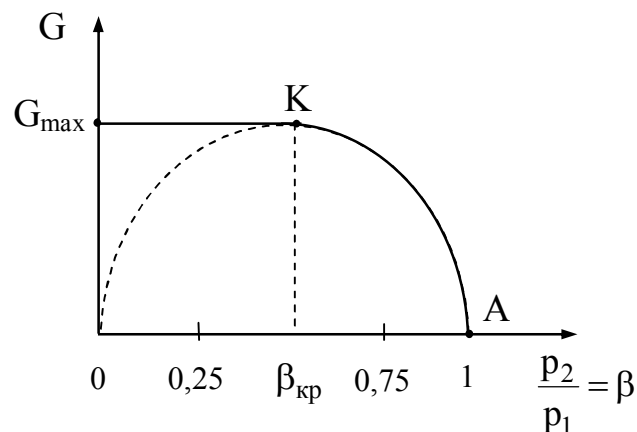


Рис. 5.3. Зависимость расхода от $P_2/P_1 = \beta$.

При $P_2/P_1 = 1$, т.е. $P_2 = P_1$, $G = 0$. Уменьшение P_2 (давления среды) приводит к увеличению расхода G – область АК.

При некотором критическом соотношении $P_2/P_1 = \beta_{кр}$ расход газа достигает своего максимального значения – точка К.

Дальнейшее снижение соотношения P_2/P_1 должно приводить к уменьшению расхода и при $P_2/P_1 = 0$ расход вновь должен быть равен 0 ($G = 0$) – область КО.

Однако при снижении P_2/P_1 ниже $\beta_{кр}$ после т.К снижения расхода не происходит, он остается равным своему максимальному

значению – область KG_{\max} . Следовательно, практическая зависимость KG_{\max} не совпадает с теоретической КО, полученной по уравнению (5.11).

Это расхождение объяснили Сен-Венон и Вантцель: при $\beta_{\text{кр}} < P_2/P_1 < 1$ (правая часть графической зависимости) давление в устье канала (на выходе) примерно равно давлению окружающей среды, куда происходит истечение, поэтому теория совпадает с практикой. Для $0 < P_2/P_1 < \beta_{\text{кр}}$ (левая часть графической зависимости) давление в устье канала не равно давлению среды, и даже при понижении давления среды до полного вакуума давление в устье канала остается постоянным.

Расчет $\beta_{\text{кр}}$ необходим для определения максимального расхода и максимальной скорости истечения газа из сопел с целью получения максимально возможной кинетической энергии (располагаемой работы) (см. уравнение 5.1).

$$\beta_{\text{кр}} = \frac{P_{\text{кр}}}{P_1} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad (5.12)$$

где $P_{\text{кр}}$ – критическое давление, Па; P_1 – начальное давление, Па; k – показатель адиабаты.

Как видно из уравнения (5.12), $\beta_{\text{кр}}$ зависит только от k – показателя адиабаты, т.е. от атомности газа (см. раздел 3.3.4).

- для одноатомных газов - $k = 1,66$ $\beta_{\text{кр}} = 0,49$;
- двухатомных - $k = 1,4$ $\beta_{\text{кр}} = 0,528$;
- трехатомных - $k = 1,33$ $\beta_{\text{кр}} = 0,546$.

Используя уравнение (5.12), определяют критическое давление газа на выходе из сопла для достижения максимального расхода:

$$P_{\text{кр}} = \beta_{\text{кр}} \cdot P_1. \quad (5.13)$$

Критическая скорость газа устанавливается при давлении равном или ниже $P_{\text{кр}}$.

5.2.Способы преобразования тепловой энергии в тепловых двигателях

Существует несколько способов, при помощи которых совершается преобразование тепловой энергии в механическую в тепловых двигателях. В зависимости от того, какой из этих способов используется, определяется и тип теплового двигателя.

Первыми были изобретены поршневые двигатели, в которых рабочее тело (газ или пар), обладающее высокой потенциальной энергией, расширяется в цилиндре с поршнем, работа расширения передается поршню, совершается возвратно–поступательное движение и при помощи кривошипно-шатунного механизма преобразуется во вращательное движение вала. К поршневым двигателям относятся паровые машины и двигатели внутреннего сгорания, циклы которых рассмотрены в главе 4. В данном типе двигателей используется только потенциальная энергия сжатого и нагретого газа и не учитывается кинетическая энергия.

В двигателях другой категории газ (или пар), обладающий большим запасом потенциальной энергии вследствие предшествующего сжатия и нагрева, вытекает из суживающегося канала (сопла) и при этом расширяется; скорость и кинетическая энергия газа за счет работы расширения увеличиваются, струю вытекающего газа направляют на изогнутые лопатки, закрепленные на диске (турбине), который крепится на валу (рис. 5.1). Кинетическая энергия газа при этом почти полностью передается от газа к валу турбины. Такие двигатели называются турбинами.

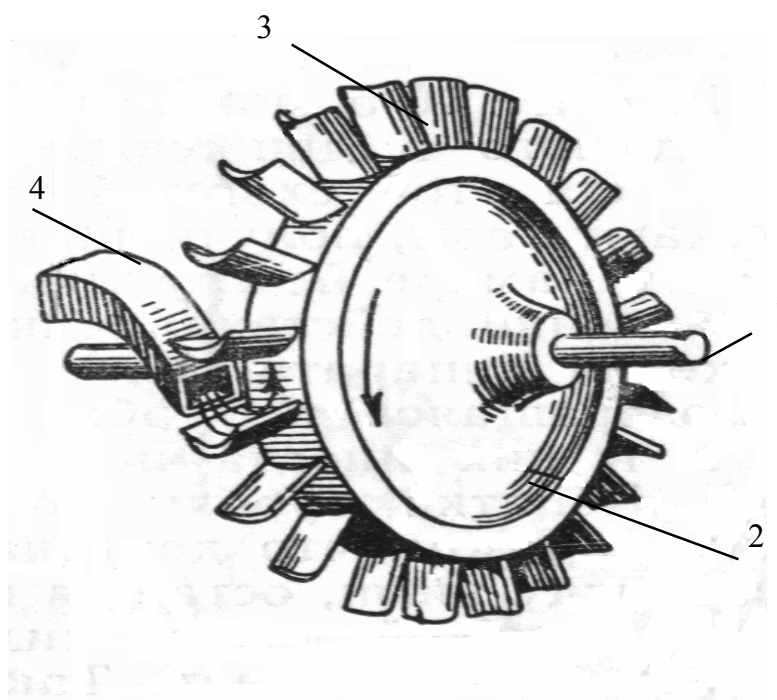


Рис. 5.4. Схема газовой турбины

На вал 1 насажен диск 2 с лопатками 3, на которые из сопла 4 поступает газ, обладающий высокой потенциальной энергией.

К такому типу двигателей относятся газовые турбины ГТУ, рабочим телом в которых являются продукты сгорания топлива. В двигателях и турбинах данного типа основную часть работы составляет располагаемая работа (см. I закон термодинамики для потока, уравнение 5.1).

Глава 6. Компрессия (сжатие) газов

При осуществлении циклов ГТУ и ДВС возникает необходимость подачи сжатого воздуха в камеру сгорания топлива, также в циклах холодильных машин применяется сжатый газ или пар. Машины, предназначенные для сжатия газов и паров, называются компрессорами.

В химической промышленности используются различные газы и их смеси с давлением от 10^{-3} до 10^8 Па. В зависимости от давления газа, создаваемого при сжатии, компрессоры подразделяются на несколько групп:

- вакуум – насос – это машина, которая удаляет газ из пространства с давлением ниже атмосферного и, сжимая его, нагнетает в пространство с атмосферным давлением;
- газодувка – машина для сжатия газа до давления 0,1 до 0,3 МПа;
- компрессор низкого давления – осуществляет сжатие до давления 0,5 – 0,6 МПа;
- компрессор среднего давления – сжимает газ до давления 3,0 МПа;
- компрессор высокого давления – сжатие до давления более 10 МПа ($\approx 10 - 100$ ат).

По принципу действия компрессоры можно разделить на два класса:

- поршневые – с возвратно-поступательным движением поршня;
- турбокомпрессоры – центробежные, осевые и винтовые.

Количественные характеристики компрессоров – объемная подача и степень сжатия.

Объемная подача – объем газа, засасываемого компрессором в единицу времени при начальных параметрах. Чаще всего используются параметры окружающей среды или нормальные физические условия $P_0 = 1,01 \cdot 10^5$ Па, $T_0 = 293,15$ К. Объемный расход газа при данных условиях выражается в $\text{м}^3/\text{с}$ или $\text{м}^3/\text{ч}$.

В зависимости от подачи различают компрессоры:

- малой подачи – до $0,003 \text{ м}^3/\text{с}$;
- средней подачи – от $0,003$ до $0,03 \text{ м}^3/\text{с}$;
- высокой подачи – более $0,03 \text{ м}^3/\text{с}$.

Степень сжатия – отношение начального объемного расхода газа к конечному.

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}. \quad (6.1)$$

Качественная характеристика работы компрессора – степень повышения давления показывает во сколько раз увеличилось давление газа при сжатии:

$$\lambda = \frac{P_2}{P_1}. \quad (6.2)$$

Различают:

- вентиляторы, степень увеличения давления в одной ступени $\lambda = 1 - 1,1$;
- газодувки $\lambda = 1,1 - 1,4$;
- компрессоры $\lambda = 3 - 4$.

6.1. Идеальный цикл одноступенчатого поршневого компрессора

Термодинамические процессы в компрессионных машинах рассматриваются с целью определения затрат работы на сжатие газа до заданного давления и выбора электродвигателя для привода компрессора.

В качестве примера можно рассмотреть цилиндр с подвижным поршнем, в котором происходит сжатие газа.

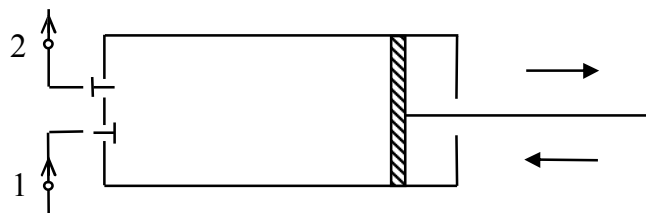


Рис. 6.1. Схема одноступенчатого поршневого компрессора: т.1 – начальное состояние газа (на всасывающей линии); т.2 – конечное состояние газа (на линии нагнетания сжатого газа)

При движении поршня вправо в цилиндре создается давление ниже атмосферного $P_1 < P_0$, открывается всасывающий клапан, и газ всасывается в цилиндр компрессора (процесс 0 – 1). При обратном ходе поршня всасывающий клапан закрывается, в цилиндре

происходит сжатие газа от давления P_1 до P_2 (процесс 1 – 2). При достижении давления P_2 открывается нагнетательный клапан, и сжатый газ нагнетается (процесс 2 – 3) в емкость для хранения (ре-сивер), откуда подается потребителю.

В идеальном цикле делается допущение, что объемный расход (объемная подача) газа равен теоретической объемной подаче, т.е. отсутствуют «мертвое пространство», трение и гидравлическое сопротивление клапанов, давление газа в процессах всасывания и нагнетания не изменяется, т.е. процессы 0 – 1 и 2 – 3 – изобарные ($P = \text{const}$).

Для процесса сжатия возможны следующие варианты:

- 1 – 2_т – $T = \text{const}$ (изотермический);
- 1 – 2_а – $s = \text{const}$ (адиабатный);
- 1 – 2_п – $n = \pm \infty$ (политропный).

Процессы всасывания (0 - 1) и нагнетания (2 -3) не являются термодинамическими, т.к. они идут без изменения параметров газа ($P = \text{const}$, $T = \text{const}$).

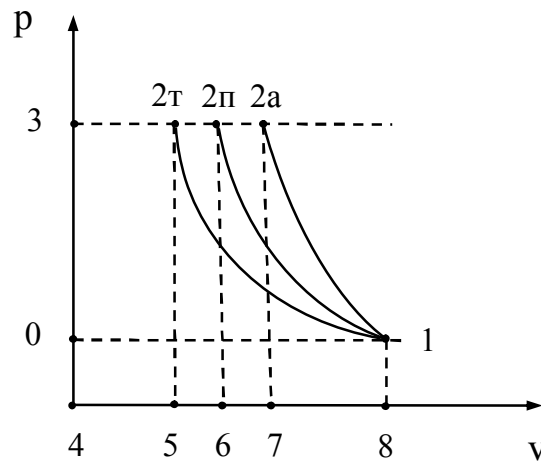


Рис. 6.2. Варианты сжатия в $P - v$ – диаграмме

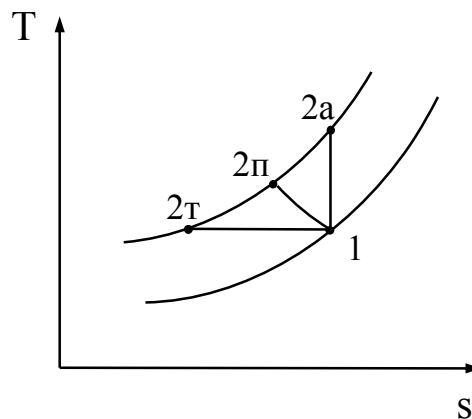


Рис. 6.3. Варианты сжатия в $T - s$ – диаграмме

Полная работа компрессора складывается из работы всасывания - F_1 , работы сжатия - F_2 и нагнетания - F_3 , следует отметить, что работа нагнетания отрицательна, поэтому:

$$\ell_k = F_1 + F_2 - F_3. \quad (6.3)$$

Расчетные формулы для всех видов работ представлены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Виды работы

Вид процесса	Работа всасывания F_1	Работа сжатия F_2	Работа нагнетания F_3
Изотермический $T = \text{const}$ $1 - 2_T$	$P_1 v_1$ $F_1 = F_{01840}$	$RT \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$ $F_2 = F_{812T58}$	$P_2 v_2$ $F_1 = F_{52T345}$
Адиабатный $s = \text{const}$ $1 - 2_a$	$P_1 v_1$ $F_1 = F_{01840}$	$\frac{1}{k-1}(P_1 v_1 - P_2 v_2)$ $F_2 = F_{812a78}$	$P_2 v_2$ $F_1 = F_{72a347}$
Политропный $n = \pm \infty$ $1 - 2_n$	$P_1 v_1$ $F_1 = F_{01840}$	$\frac{1}{n-1}(P_1 v_1 - P_2 v_2)$ $F_2 = F_{812n68}$	$P_2 v_2$ $F_1 = F_{62n346}$

При расчете по этим формулам, как для работы сжатия, получим отрицательные значения. Графически работа будет равна в P-v-диаграмме площади под кривой, изображающей процесс.

Расчетные формулы для результирующей работы компрессора (ℓ_k) с учетом связи параметров для каждого вида процесса представлены в табл. 6.2. В P-v- диаграмме результирующая работа компрессора численно равна площади фигуры, ограниченной изобарами всасывающей (0 - 1) и нагнетательной (2 - 3) линиями, кривой сжатия (1 - 2) и осью ординат.

Таблица 6.2

Работа компрессора

Вид процесса	Работа компрессора, F_k
Изотермический $T = \text{const}$ $1 - 2_T$	$RT \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$ $F_k = F_{012T30}$
Адиабатный $s = \text{const}$ $1 - 2_a$	$\frac{k}{k-1}(P_1 v_1 - P_2 v_2)$ $F_2 = F_{012a30}$
Политропный $n = \pm \infty$ $1 - 2_n$	$\frac{n}{n-1}(P_1 v_1 - P_2 v_2)$ $F_2 = F_{012n30}$

Изменение параметров при различных видах сжатия представлено в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Название процесса	Зависимость параметров	
Изотермический $T = \text{const}$ $1 - 2_T$	$P_1/P_2 = V_2/V_1$	
Адиабатный $s = \text{const}$ $1 - 2_a$	$P_1/P_2 = (V_2/V_1)^k$ $T_1/T_2 = (V_2/V_1)^{k-1}$ $T_1/T_2 = (P_1/P_2)^{(k-1)/k}$	$TP^{(1-k)/k} = \text{const}$ $PV^k = \text{const}$ $TV^{k-1} = \text{const}$
Полиетропный $n = \pm \infty$ $1 - 2_n$	$P_1/P_2 = (V_2/V_1)^n$ $T_1/T_2 = (V_2/V_1)^{n-1}$ $T_1/T_2 = (P_1/P_2)^{(n-1)/n}$	$TP^{(1-n)/n} = \text{const}$ $PV^n = \text{const}$ $TV^{n-1} = \text{const}$

При сопоставлении численного значения работы и площадей в P-v- диаграмме можно сделать вывод, что минимальные затраты энергии при изотермическом сжатии, а максимальные - в адиабатном процессе, т.е. $l_{к1-2a} > l_{к1-2n} > l_{к1-2T}$.

Поэтому при определении затраченной работы (энергии) и выборе электродвигателя для привода компрессора расчет ведут на самый энергоемкий процесс, т.е. адиабатный.

6.2. Многоступенчатое сжатие

На практике часто требуется получить газ с высоким давлением, что невозможно при одноступенчатом сжатии. Степень повышения давления для одноступенчатого компрессора $\lambda = \frac{P_2}{P_1} = 8 \div 12$.

При сжатии газа с увеличением степени повышения давления избыток работы адиабатного цикла прогрессивно растет. Температура газа увеличивается в степенной зависимости:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad \text{или} \quad T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k}{k-1}} = T_1 \cdot (\lambda)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (6.4)$$

Высокая температура газа в конце сжатия может быть причиной самовоспламенения смазочных материалов.

Для получения газов с высоким давлением применяют многоступенчатое сжатие, где после каждой ступени газ охлаждается до первоначальной температуры.

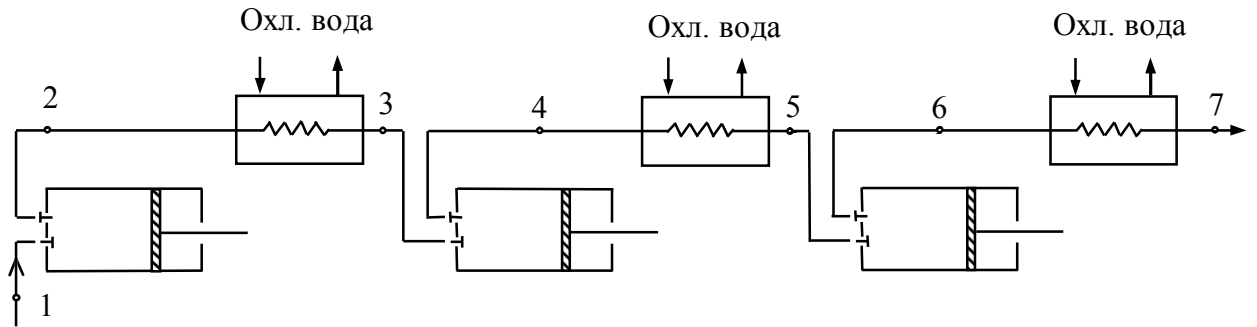


Рис. 6.3. Схема многоступенчатого компрессора

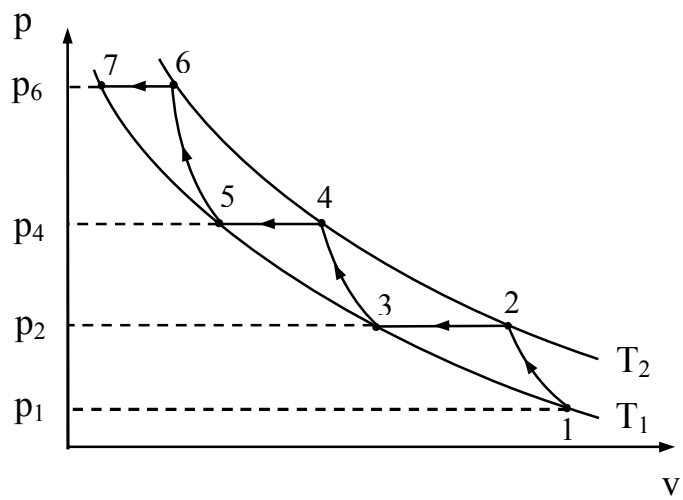


Рис. 6.4. Многоступенчатое сжатие в P-v- диаграмме

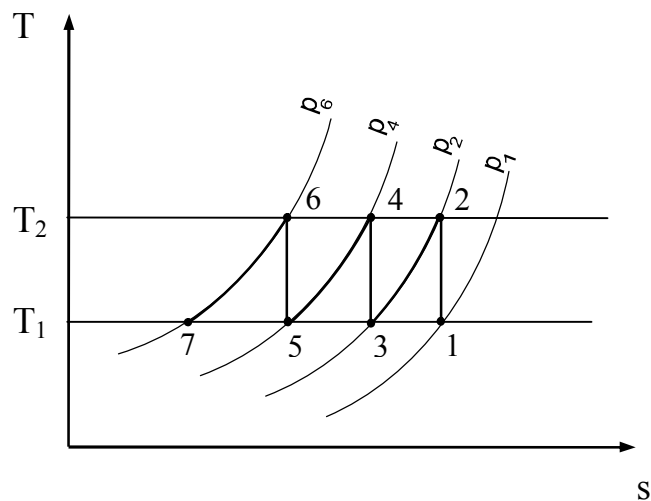


Рис. 6.5. Многоступенчатое сжатие в Т-s- диаграмме

Термодинамические процессы, составляющие цикл многоступенчатого компрессора:

0 – 1 – всасывание газа в I ступень, процесс считаем изобарным $P = \text{const}$;

1 – 2 – адиабатное сжатие в I ступени компрессора;

2 – 3 – изобарное охлаждение сжатого газа после I ступени;

3 – 4 – адиабатное сжатие во II ступени;

4 – 5 – изобарное охлаждение газа после II ступени;

5 – 6 – адиабатное сжатие в III ступени;

6 – 7 – - изобарное охлаждение после III ступени и нагнетание газа.

Важным обстоятельством при расчете многоступенчатого компрессора является правильное распределение нагрузки по ступеням. Расчет ведут таким образом, чтобы степень повышения давления по ступеням, затраченная работа и количество отводимой теплоты были примерно одинаковыми:

$$\lambda = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_2} = \frac{P_4}{P_3}. \quad (6.5)$$

Перемножив члены уравнения, получим:

$$\lambda^3 = \frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{P_3}{P_2} \cdot \frac{P_4}{P_3} = \frac{P_4}{P_1} \quad \text{или} \quad \lambda = \sqrt[3]{\frac{P_4}{P_1}}. \quad (6.6)$$

Для общего случая:

$$\lambda^m = \frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{P_3}{P_2} \cdot \frac{P_4}{P_3} \dots \frac{P_m}{P_1} = \frac{P_m}{P_1} \quad \text{или} \quad \lambda = \sqrt[m]{\frac{P_m}{P_1}} \quad \text{или} \quad \lambda = \sqrt[m]{\frac{P_K}{P_H}}, \quad (6.7)$$

где m – число ступеней, P_H и P_K – начальное и конечное давление газа, соответственно.

Работа компрессора по ступеням:

$$\ell^I = \ell^{II} = \ell^{III}.$$

Теплота, отводимая в теплообменном аппарате:

$$q^I = q^{II} = q^{III}.$$

Расчет многоступенчатого сжатия ведут таким образом, чтобы мощность ступеней и тепловая нагрузка теплообменных аппаратов была одинаковой.

Глава 7. Задачи

7.1. Примеры решения задач

Задача 1.

При изобарном нагреве 5 м^3 воздуха, взятого при нормальных физических условиях, его температура повышается до $250 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить параметры газа в начале и конце процесса, рассчитать изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии, работу, производимую газом, теплоту, подводимую к системе. При расчете термодинамических характеристик учесть зависимость теплоемкости от температуры, приняв эту зависимость прямолинейной. Схематично изобразить данный процесс в P-v- и T-s-диаграммах.

Решение.

1. Перевод единиц измерения всех известных величин в «СИ»:

Нормальные физические условия: $P_0 = 760 \text{ мм рт. ст.}$, $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.
Следовательно: $P_0 = 760 \text{ мм рт. ст.} = 760 \cdot 133,3 = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $T_0 = 273,15 \text{ К}$.

Дано:

$$P_1 = P_0 = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$T_1 = T_0 = 273,15 \text{ К};$$

$$T_2 = 250 + 273,15 = 532,15 \text{ К};$$

$$V_1 = 5 \text{ м}^3.$$

2. Определение массы газа из уравнения связи параметров Менделеева – Клапейрона:

$$P_1 V_1 = m R T_1 \quad \rightarrow \quad m = \frac{P_1 V_1}{R T_1} = \frac{1,01 \cdot 10^5 \cdot 5}{287 \cdot 273,15} = 6,4 \text{ кг},$$

где $R = 287 \text{ Дж/(кг К)}$ – характеристическая газовая постоянная воздуха, определяется из таблицы 1 приложения или рассчитывается (1.13):

$$R = \frac{P \cdot V}{m \cdot T} = \frac{R_0}{M} = \frac{8314}{29} = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

3. Определение объема газа в конце процесса по уравнению связи параметров для изобарного процесса, по закону Гей-Люссака, уравнение (1.10), или уравнению связи параметров Менделеева – Клапейрона:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}; \quad V_2 = \frac{V_1 \cdot T_2}{T_1} = \frac{5 \cdot 532,15}{273,15} = 9,7 \text{ м}^3$$

$$\text{или } V_2 = \frac{mRT_2}{P_2} = \frac{6,4 \cdot 287 \cdot 532,15}{1,01 \cdot 10^5} = 9,7 \text{ м}^3.$$

4. Определение теплоемкости газа

Известно, что теплоемкость газа зависит от температуры. Воспользуемся интерполяционными уравнениями из таблицы 2 приложения:

- изобарная массовая теплоемкость:
 $c_p = 0,9952 + 0,00009349 \cdot t_{cp} = 0,9952 + 0,00009349 \cdot 125 = 1,007$
 кДж/(кг К)

$$t_1 = 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad t_2 = 250 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_{cp} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{0 + 250}{2} = 125 \text{ } ^\circ\text{C};$$

- изохорная массовая теплоемкость
 $c_v = 0,7084 + 0,00009349 \cdot t_{cp} = 0,7084 + 0,00009349 \cdot 125 = 0,71$
 кДж/(кг К).

Сведем все параметры газа в таблицу:

Номер точки	Параметры газа			Масса, кг
	P, Па	T, К	V, м ³	
1	$1,01 \cdot 10^5$	273,15	5	6,7
2	$1,01 \cdot 10^5$	532,15	9,7	

5. Термодинамические характеристики изобарного процесса

Формулы для расчета представлены в таблице 3 приложения.

- изменение внутренней энергии:
 $\Delta U = m C_v (T_2 - T_1) = 6,7 \cdot 0,71 \cdot (532,15 - 273,15) = 1232,1$ кДж;

- работа, совершаемая газом:
 $L = m R (T_2 - T_1) = 6,7 \cdot 287 \cdot (532,15 - 273,15) = 498031,1$ Дж = 498,03 кДж

или $L = P (V_2 - V_1)$;

- теплота, подведенная к газу:
 $Q = m C_p (T_2 - T_1) = 6,7 \cdot 1,007 \cdot (532,15 - 273,15) = 1747,4$ кДж;

- изменение энтальпии:
 $\Delta I = Q = m C_p (T_2 - T_1) = 6,7 \cdot 1,007 \cdot (532,15 - 273,15) = 1747,4$ кДж;

- изменение энтропии:
 $\Delta S = m \cdot C_p \cdot \ln (T_2/T_1) = 6,7 \cdot 1,007 \cdot \ln (532,15/273,15) = 4,5$ кДж/К.

Сведем данные в таблицу:

Процесс	ΔU , кДж	L, кДж	Q, кДж	ΔI , кДж	ΔS , кДж/К
1 - 2	1232,1	498,03	1747,4	1747,4	4,5

Проверить результаты расчетов можно, воспользовавшись уравнением I закона термодинамики $Q = \Delta U + L$. Незначительное несовпадение расчетных данных может быть объяснено округлением численных значений величин характеристической газовой постоянной (R) и удельных массовых теплоемкостей c_p и c_v .

6. Изображение процесса изобарного нагрева в P-v- и T-s-диаграммах

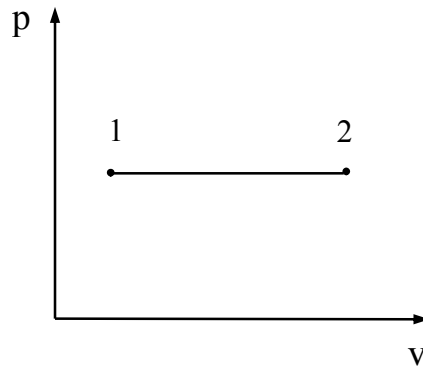


Рис. 7.1. Процесс изобарного нагрева в P-v-диаграмме

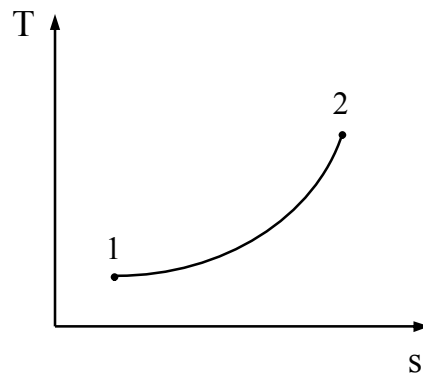


Рис. 7.2. Процесс изобарного нагрева в T-s-диаграмме

Задача 2.

1 кг воздуха с начальным давлением 1 ат и температуре 15 °С адиабатно сжимается в компрессоре до конечного давления 0,8 МПа, затем поступает в камеру сгорания, где изобарно нагревается до температуры 1200 °С. Определить параметры газа в начале и в конце сложного термодинамического процесса, затраченную на сжатие работу и теплоту, подведенную при нагреве. Изобразить последовательно идущие процессы (1 – 2 – адиабатный, 2 – 3 - изобарный) в P-v- и T-s- диаграммах.

Решение.

1. Перевод единиц измерения всех известных величин в «СИ»:

Дано:

$$\begin{aligned} P_1 &= 1 \text{ ат} = 0,98 \cdot 10^5 \text{ Па}; & P_2 &= 0,8 \text{ МПа} = 0,8 \cdot 10^6 \text{ Па} = 8 \cdot 10^5 \text{ Па}; \\ T_1 &= 15 + 273,15 \text{ К} = 288,15 \text{ К}; & T_3 &= 1200 + 273,15 = 1473,15 \text{ К}; \\ R &= 287 \text{ Дж}/(\text{кг К}). & P_3 &= P_2. \end{aligned}$$

2. Определение начального удельного объема воздуха из уравнения связи параметров Менделеева – Клапейрона:

$$P_1 v_1 = R T_1 \quad \rightarrow \quad v_1 = \frac{R T_1}{P_1} = \frac{287 \cdot 288,15}{0,98 \cdot 10^5} = 0,84 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}},$$

где $R = 287 \text{ Дж}/(\text{кг К})$ – характеристическая газовая постоянная воздуха, определяется из таблицы 1 приложения или рассчитывается (1.13).

3. Определение объема газа после сжатия по уравнению связи параметров для адиабатного процесса:

$$P_1 v_1^k = P_2 v_2^k; \quad v_2 = v_1 \cdot \sqrt[k]{\frac{P_1}{P_2}} = 0,84 \cdot \sqrt[1,4]{\frac{0,98}{8,0}} = 0,18 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

4. Температура воздуха в конце сжатия по уравнению Менделеева - Клапейрона:

$$P_2 v_2 = R T_2; \quad T_2 = \frac{P_2 v_2}{R} = \frac{8,0 \cdot 10^5 \cdot 0,18}{287} = 501,74 \text{ К}.$$

5. Удельный объем газа в конце процесса изобарного нагрева по закону Гей-Люссака: $P_3 = P_2$;

$$\frac{v_2}{v_3} = \frac{T_2}{T_3}; \quad v_3 = \frac{v_2 \cdot T_3}{T_2} = \frac{0,18 \cdot 1473,15}{501,74} = 0,53 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Сведем все параметры газа в таблицу:

Номер точки	Параметры газа		
	P, Па	T, К	v, м ³
1	$0,98 \cdot 10^5$	288,15	0,84
2	$8,0 \cdot 10^5$	501,74	0,18
3	$8,0 \cdot 10^5$	1473,15	0,53

6. Определение теплоемкости газа для интервала температур $t_2 \div t_3$

Воспользуемся интерполяционными уравнениями из таблицы 2 приложения:

изобарная массовая теплоемкость воздуха

$$c_p = 0,9952 + 0,00009349 \cdot t_{cp} = 0,9952 + 0,00009349 \cdot 714,3 = 1,07 \text{ кДж/(кг К)};$$

$$t_1 = 0 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad t_2 = 250 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_{cp} \frac{t_2 + t_3}{2} = \frac{228,59 + 1200}{2} = 714,3 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

7. Термодинамические характеристики процессов

Формулы для расчета представлены в таблице 3 приложения.

а. Работа, затраченная на адиабатное сжатие воздуха:

$$\ell_{1-2} = \frac{1}{k-1} (P_1 v_1 - P_2 v_2) = \frac{0,98 \cdot 10^5 \cdot 0,84 - 8,0 \cdot 10^5 \cdot 0,18}{1,4-1} = -154200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = -154,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

теплота, подведенная к газу:

$$q_{2-3} = C_p (T_3 - T_2) = 1,07 \cdot (1473,15 - 501,74) = 1039,41 \text{ кДж/кг}.$$

8. Изображение процесса 1 – 2 – 3 в P-v- и T-s-диаграммах:

1 – 2 – адиабатное сжатие, 2 – 3 – изобарный нагрев.

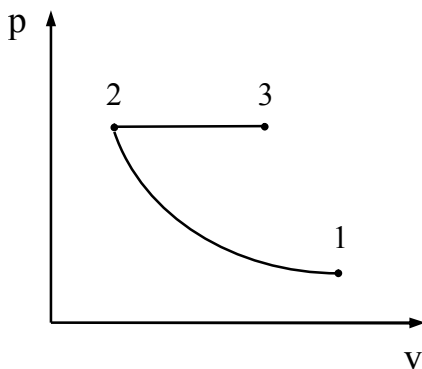


Рис. 7.1. P-v-диаграмма

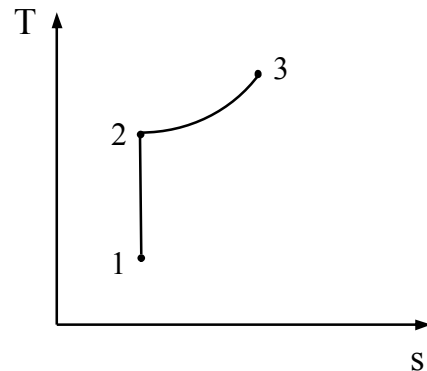


Рис. 7.2. T-s-диаграмма

Задача 3.

Рассчитать цикл, состоящий из 4 термодинамических процессов. Исходные данные представлены в таблице 1. Расчет вести на 1 кг воздуха.

Определить:

1. Параметры характеристических точек (T, P, v).
2. Затраченную в процессе сжатия работу (ℓ_k), подводимую при нагреве теплоту (q_1), работу турбины при расширении газа (ℓ_T), отводимую теплоту в процессе охлаждения (q_2). Дать определение каждого процесса цикла (например, 1-2 – изохорный нагрев и т.д.).
3. Термический КПД (η_t) данного цикла и КПД цикла Карно (η_t^K) в заданном интервале температур.
4. Изобразить цикл в P - v - и T - s -диаграммах.
5. Для воздуха характеристическая газовая постоянная $R = 287$ Дж/(кг К); удельные массовые теплоемкости принять $c_v = 0,72$ кДж/(кг К); $c_p = 1,01$ кДж/(кг К); показатель адиабаты для двухатомного газа $k = 1,4$.
6. Расчетные данные внести в таблицу 2.

Таблица 1

Исходные данные

Вариант	Заданные параметры точек				Процесс			
	P_1 , МПа	v_1 , м ³ /кг	P_2 , МПа	T_3 , К	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 1
1	0,8	0,12	2,0	800	$n=1,35$	$P=c$	$\Delta q=0$	$P=c$

Решение.

Представляем алгоритм расчета данного цикла.

1. Определение параметров точек

- Для т.1 по уравнению Менделеева – Клапейрона определяем температуру T_1 :

$$P_1 v_1 = R T_1 \quad \rightarrow \quad T_1 = \frac{P_1 v_1}{R}.$$

- Для т.2 определяем объем v_2 из уравнения связи параметров политропного процесса и температуру:

$$P_1 v_1^n = P_2 v_2^n; \quad v_2 = v_1 \cdot \sqrt[n]{\frac{P_1}{P_2}}; \quad T_2 = \frac{P_2 v_2}{R}.$$

- Для т.3 по закону Гей-Люссака определяем объем v_3 :

$$P_2 = P_3; \quad \frac{v_2}{v_3} = \frac{T_2}{T_3}.$$

- Для т.4 известно давление, т.к. процесс 4 – 1- изобарный $P_4 = P_1 = 0,8$ МПа. Далее используем связь параметров для адиабатного процесса 3 – 4.

$$P_3 v_3^k = P_4 v_4^k; \quad v_4 = v_3 \cdot \sqrt[k]{\frac{P_3}{P_4}}.$$

Температуру т.4 находим, используя уравнение Менделеева – Клапейрона: $T_4 = \frac{P_4 V_4}{R}$.

2. Определение термодинамических характеристик цикла:

- работа, затраченная на сжатие газа в процессе 1 – 2 ($n = 1,35$) – работа компрессора:

$$\ell_k = \ell_{1-2} = \frac{1}{n-1} (P_1 v_1 - P_2 v_2) \quad \text{или} \quad \ell_k = \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2);$$

- подводимая теплота в процессе 2 – 3 ($P = \text{const}$):

$$q_1 = q_{2-3} = c_p (T_3 - T_2);$$

- работа, полученная при адиабатном расширении газа на лопатках турбины в процессе 3 – 4 ($\Delta q = 0$ или $s = \text{const}$) – работа турбины:

$$\ell_T = \ell_{3-4} = \frac{1}{k-1} (P_3 v_3 - P_4 v_4) \quad \text{или} \quad \ell_T = \frac{R}{k-1} (T_3 - T_4);$$

- теплота, отводимая в процессе охлаждения 4 – 1 ($P = \text{const}$):

$$q_2 = q_{4-1} = c_p (T_3 - T_4).$$

3. Термические КПД:

- термический КПД цикла ГТУ:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1};$$

- термический КПД цикла Карно в заданном интервале температур:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}}.$$

4. Изображение цикла ГТУ на диаграммах см. раздел 4.3.

7.2. Контрольные задачи

Задача 1.

Как изменится объем m кг газа при изобарном нагреве от t_1 до t_2 при давлении P_1 . Определить параметры характеристических точек, термодинамические характеристики процесса: изменение внутренней энергии, работу, теплоту, изменение энтальпии и энтропии. Изобразить данный процесс в P - v - и T - s -диаграммах.

Данные для расчета в таблице 1П.

Таблица 1П

№ п/п	Газ	$P_1 \cdot 10^{-5}$, Па	t_1 , °C	t_2 , °C	m , кг
1	N ₂	2,5	50	250	2
2	CO ₂	3,3	55	300	3
3	CO	4,5	60	300	4
4	NH ₃	5,7	65	350	5
5	Воздух	2,3	70	350	6
6	H ₂	3,5	75	400	7
7	CH ₄	4,7	80	450	8
8	SO ₂	5,2	85	450	10
9	SO ₃	2,8	90	500	2
10	H ₂ S	3,9	100	550	3
11	Cl ₂	4,0	50	250	4
12	NO ₂	5,1	55	300	5
13	NO	2,2	60	300	6
14	He	3,2	65	350	7
15	Ne	4,3	70	350	8
16	Ar	5,5	75	400	9
17	N ₂	2,5	80	450	10
18	CO ₂	3,6	85	450	2
19	CO	4,4	90	500	3
20	NH ₃	5,0	100	550	4

Задача 2.

Определить массу израсходованного газа из баллона емкостью V л, если начальные показания манометра P^H_M . После использования газа показания манометра составили $P^K_M = 1,3$ ат. Температура газа снизилась на 20 $^{\circ}\text{C}$. Начальная температура газа t_1 . Барометрическое (атмосферное) давление $P_{\text{бар}} = 760$ мм рт. ст.

Данные для расчета в таблице 2П.

Таблица 2П

№ п/п	Газ	V , л	P^H_M , ат	t_1 , $^{\circ}\text{C}$
1	N_2	30	5,0	20
2	CO_2	35	5,2	30
3	CO_2	40	5,4	40
4	NH_3	45	5,6	20
5	Воздух	50	5,8	30
6	H_2	55	6,0	40
7	CH_4	60	6,2	20
8	SO_2	65	6,4	30
9	SO_3	70	6,6	40
10	H_2S	75	6,8	20
11	Cl_2	30	7,0	30
12	NO_2	35	7,2	40
13	NO_2	40	7,4	20
14	He	45	7,6	30
15	Ne	50	7,8	40
16	Ar	55	8,0	20
17	N_2	60	8,2	30
18	CO_2	65	8,4	40
19	CO_2	70	8,6	20
20	NH_3	75	8,8	30

Задача 3.

Определить массовый или объемный состав газовой смеси, состоящей из продуктов сгорания топлива, молекулярную массу, плотность, удельные массовые теплоемкости c_p и c_v смеси при температуре t °С.

Данные для расчета в таблице 3П.

Таблица 3П

№ п/п	Состав продуктов сгорания	Масс (g) объемн. (г)доли	Концентрация	t, °С	№ п/п	Состав продуктов сгорания	Масс (g) объемн.(г)доли	Концентрация	t, °С
1	CO CO ₂ N ₂ H ₂ O	g	0,3 0,1 0,5 0,1	40	11	N ₂ H ₂ O CO CO ₂	g	0,7 0,1 0,1 0,1	40
2	CO CO ₂ N ₂ H ₂ O	г	0,33 0,07 0,5 0,1	45	12	N ₂ H ₂ O CO CO ₂	г	0,6 0,1 0,2 0,1	45
3	CO CO ₂ N ₂ H ₂ O	g	0,35 0,05 0,5 0,1	50	13	N ₂ H ₂ O CO CO ₂	g	0,75 0,1 0,05 0,1	50
4	CO CO ₂ N ₂ H ₂ O	г	0,38 0,02 0,5 0,1	55	14	N ₂ H ₂ O CO CO ₂	г	0,78 0,02 0,1 0,1	55
5	CO CO ₂ N ₂ H ₂ O	g	0,4 0,1 0,4 0,1	60	15	N ₂ H ₂ O CO CO ₂	g	0,6 0,1 0,1 0,2	60
6	CO CO ₂ N ₂ H ₂ O	г	0,42 0,08 0,4 0,1	65	16	N ₂ H ₂ O CO CO ₂	г	0,72 0,08 0,1 0,1	65
7	CO CO ₂ N ₂ H ₂ O	g	0,45 0,05 0,4 0,1	70	17	N ₂ H ₂ O CO CO ₂	g	0,65 0,05 0,2 0,1	70
8	CO CO ₂ N ₂ H ₂ O	г	0,48 0,02 0,4 0,1	75	18	N ₂ H ₂ O CO CO ₂	г	0,68 0,02 0,2 0,1	75
9	CO CO ₂ N ₂ H ₂ O	g	0,5 0,05 0,35 0,1	80	19	N ₂ H ₂ O CO CO ₂	g	0,5 0,05 0,35 0,1	80
10	CO CO ₂ N ₂ H ₂ O	г	0,52 0,08 0,2 0,2	85	20	N ₂ H ₂ O CO CO ₂	г	0,52 0,08 0,2 0,2	85

Задача 4.

В цилиндре с подвижным поршнем находится V л газа при давлении P_1 . При сжатии газа давление увеличилось в " λ " раз. Определить температуру газа в начале и в конце процесса, изменение объема и работу, затраченную на сжатие газа. Массу газа принять равной 1 кг. Виды процесса сжатия указаны таблице: $s = \text{const}$ – адиабатный, $n=1,35$ (1,3) - политропный

Данные для расчета в таблице 4П.

Таблица 4П

№ п/п	Газ	V л	$P_1 \cdot 10^{-5}$, Па	Вид сжатия	$\lambda=P_2/P_1$
1	N_2	3,0	2,0	$n=1,35$	5
2	O_2	3,5	2,2	$n=1,3$	4
3	CO_2	4,0	2,4	$n=1,35$	3
4	NH_3	4,5	2,6	$n=1,3$	2
5	Воздух	5,0	2,8	$n=1,35$	5
6	CH_4	5,5	3,0	$n=1,3$	4
7	CO_2	6,0	3,2	$n=1,35$	3
8	SO_2	6,5	3,4	$n=1,3$	2
9	SO_3	7,0	3,6	$n=1,35$	5
10	Cl_2	7,5	3,8	$n=1,3$	4
11	NO_2	8,0	4,0	$s = \text{const}$	3
12	SO_2	8,5	2,0	$s = \text{const}$	2
13	He	9,0	2,2	$s = \text{const}$	5
14	Ne	9,5	2,4	$s = \text{const}$	4
15	Ar	10,0	2,6	$s = \text{const}$	3
16	N_2	9,5	2,8	$s = \text{const}$	2
17	O_2	9,0	3,0	$s = \text{const}$	5
18	CO_2	8,5	3,2	$s = \text{const}$	4
19	NH_3	8,0	3,4	$s = \text{const}$	3
20	Воздух	7,5	3,6	$s = \text{const}$	2

Задача 5.

1 кг газа с начальным давлением P_1 и температурой t_1 изохорно нагревается до t_2 . Затем адиабатно расширяется до 5-кратного увеличения объема. Определить параметры газа в характеристических точках, количество подводимой теплоты, работу, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в процессах. Изобразить термодинамические процессы в P-v- и T-s-диаграммах.

Данные для расчета в таблице 5П.

Таблица 5П

№ п/п	Газ	P_1 , МПа	t_1 , °С	t_2 , °С
1	O ₂	1,0	30	100
2	N ₂	1,2	35	105
3	NO	1,4	40	100
4	NO ₂	1,6	45	105
5	NO ₃	1,8	50	100
6	Cl ₂	2,0	55	105
7	Воздух	2,2	60	110
8	CO	2,4	65	115
9	CO ₂	2,6	70	110
10	H ₂ S	2,8	30	120
11	NH ₃	3,0	35	125
12	SO ₂	1,0	40	120
13	SO ₃	1,2	45	125
14	Ar	1,4	50	120
15	Ne	1,6	55	125
16	He	1,8	60	120
17	O ₂	2,0	65	125
18	N ₂	2,2	70	130
19	NO	2,4	30	135
20	NO ₂	2,6	35	130

Задача 6.

При изобарном охлаждении m кг газа, находящегося при давлении P и температуре t_1 , отводится количество теплоты Q (при охлаждении $Q < 0$). Удельную массовую теплоемкость газа взять при t_1 . Определить начальный и конечный объем газа, конечную температуру. Изобразить процесс в P - v - и T - s - диаграммах.

Данные для расчета в таблице 6П.

Таблица 6П

№ п/п	Газ	m , кг	P , МПа	t_1 , °С	Q , кДж
1	N_2	2	0,1	100	- 30
2	NO	4	0,2	120	- 35
3	NO_2	6	0,3	140	- 40
4	NO_3	8	0,4	160	- 45
5	NH_3	10	0,5	180	- 50
6	CO	2	0,15	200	- 30
7	CO_2	4	0,25	100	- 35
8	Cl_2	6	0,35	120	- 40
9	O_2	8	0,45	140	- 45
10	H_2S	10	0,55	160	- 50
11	Воздух	2	0,1	180	- 30
12	SO_2	4	0,2	200	- 35
13	SO_3	6	0,3	100	- 40
14	Ar	8	0,4	120	- 45
15	He	10	0,5	140	- 50
16	N_2	2	0,15	160	- 30
17	NO	4	0,25	180	- 35
18	NO_2	6	0,35	200	- 40
19	NO_3	8	0,45	100	- 45
20	CO_2	10	0,55	120	- 50

Задача 7.

2 м³ газа изохорно нагреваются от 30 °С до 80 °С, а затем изобарно охлаждается до 50 °С. Определить параметры газа в начале и конце процессов (для точек 1, 2 и 3), количество теплоты, подведенное в процессе нагрева (Q_{1-2}) и отводимое при охлаждении (Q_{2-3}). Учесть зависимость теплоемкости от температуры. Изобразить процесс в P-v- и T-s - диаграммах.

Данные для расчета в таблице 7П.

Таблица 7П

№ п/п	Газ	m, кг	№№	Газ	m, кг
1	N ₂	2	11	Воздух	2
2	NO	4	12	SO ₂	4
3	NO ₂	6	13	SO ₃	6
4	NO ₃	8	14	Ar	8
5	NH ₃	10	15	He	10
6	CO	2	16	N	2
7	CO ₂	4	17	NO	4
8	Cl ₂	6	18	NO ₂	6
9	O ₂	8	19	NO ₃	8
10	H ₂ S	10	20	CO	10

Задача 8.

1. Рассчитать цикл, состоящий из 4 термодинамических процессов. Исходные данные представлены в таблице 8-1 П. Рабочим телом является воздух. Для воздуха характеристическая газовая постоянная $R = 287$ Дж/(кг К); удельные массовые теплоемкости принять $c_v = 0,72$ кДж/(кг К); $c_p = 1,01$ кДж/(кг К); показатель адиабаты для двухатомного газа $k = 1,4$.

Определить:

2. Параметры характеристических точек (T, P, v).
3. Рассчитать затраченную (совершаемую работу), подводимую (отводимую теплоту) в каждом процессе. Дать определение каждого процесса цикла (например, 1-2 – изохорный нагрев, и т.д.).
4. Термический КПД (η_t) данного цикла и КПД цикла Карно (η_t^K) в заданном интервале температур.
5. Изобразить цикл в P- v- и T-s-диаграммах.

Расчетные данные внести в таблицу 8-2П.

Исходные данные

Таблица 8-1 П

№ п/п	Заданные параметры точек							Процесс			
	P ₁ , МПа	v ₁ , м ³ /кг	t ₁ , °С	P ₂ , МПа	t ₂ , °С	P ₃ , МПа	t ₃ , °С	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 1
1	0,100	-	0	0,40	-	-	527	n=1,35	P=c	s = c	P = c
2	0,101	0,804	-	-	145	1,08	-	n=1,32	v=c	n=1,35	P = c
3	0,102	-	15	0,60	-	-	677	Δq=0	P=c	n=1,35	P = c
4	0,100	0,841	-	-	246	1,36	-	Δq=0	v = c	n=1,3	P = c
5	0,101	-	25	0,45	-	-	777	n=1,32	P=c	s = c	P = c
6	0,102	0,853	-	-	216	-	827	Δq=0	P=c	n=1,4	P = c
7	0,100	-	35	0,65	-	-	527	Δq=0	P = c	s = c	P = c
8	0,101	0,775	-	-	213	1,28	-	Δq=0	v = c	n=1,35	P = c
9	0,102	-	10	0,40	-	-	627	n=1,33	P=c	s = c	P = c
10	0,100	0,826	-	-	169	0,97	-	Δq=0	v = c	n=1,4	P = c
11	0,101	-	20	0,50	-	-	727	Δq=0	P=c	n=1,35	P = c
12	0,102	0,838	-	-	212	1,20	-	Δq=0	v = c	n=1,4	P = c
13	0,090	-	30	0,60	-	-	827	n=1,37	P = c	s = c	P = c
14	0,092	0,961	-	-	253	0,99	-	Δq=0	v = c	n=1,4	P = c
15	0,094	-	0	0,70	-	-	577	n=1,35	P = c	s = c	P = c
16	0,096	0,846	-	-	147	-	627	Δq=0	P=c	s = c	P = c
17	0,098	-	15	0,50	-	1,05	-	Δq=0	v = c	n=1,37	P = c
18	1,00	0,841	-	-	193	-	727	n=1,35	P = c	s = c	P = c
19	0,090	-	25	0,70	-	-	777	Δq=0	P = c	s = c	P = c
20	0,092	0,945	-	-	237	-	827	n=1,35	P = c	s = c	P = c

Таблица 8-2 П

Номер и параметры точек				Характеристики процессов				Термический КПД	
точка	P, кПа	T, К	v, м ³ /кг	процесс	вид процесса	работа, ℓ, кДж/кг	теплота, q, кДж/кг	η _t , %	η _t ^к , %
1				1 - 2					
2				2 - 3					
3				3 - 4					
				4 - 1					

Задача 9.

1 кг воздуха адиабатно сжимается (процесс 1 - 2) от давления P₁ = 1 ат до давления P₂, МПа, степень повышения давления $\lambda = \frac{P_2}{P_1}$, а затем нагревается (вид процесса нагрева 2 - 3 см. в таблице). Температура газа повышается на 800 °С. Начальная температура газа t₁. Определить параметры газа в характеристических точках (1, 2, 3), работу, затраченную на сжатие (ℓ₁₋₂) и подведенную для нагрева теплоту (q₁₋₂). Изобразить процесс в P-v- и T-s - диаграммах. Данные для расчета в таблице 9П.

Таблица 9 П

№ п/п	Газ	Вид процесса 2 - 3	t ₁ , °С	$\lambda = \frac{P_2}{P_1}$
1	O ₂	P = const	30	3
2	N ₂	v = const	35	4
3	NO	P = const	40	5
4	NO ₂	v = const	45	6

5	NO ₃	P = const	50	7
6	Cl ₂	v = const	55	3
7	Воздух	P = const	60	4
8	CO	v = const	65	5
9	CO ₂	P = const	70	6
10	H ₂ S	v = const	30	7
11	NH ₃	P = const	35	3
12	SO ₂	v = const	40	4
13	SO ₃	P = const	45	5
14	Ar	v = const	50	6
15	Ne	P = const	55	7
16	He	v = const	60	3
17	O ₂	P = const	65	4
18	N ₂	v = const	70	5
19	NO	P = const	30	6
20	NO ₂	v = const	35	7

Задача 10.

В цикле поршневого двигателя со смешанным подводом теплоты начальное давление P_1 , начальная температура t_1 , степень сжатия ε , степень повышения давления λ , степень предварительного изобарного расширения ρ . Рабочее тело – сухой воздух ($R = 287$ Дж/(кг К); $c_v = 0,72$ кДж/(кг К); $c_p = 1,01$ кДж/(кг К); $k = 1,4$). Для данного цикла определить параметры в характеристических точках цикла, работу цикла, полезно использованную теплоту, термический КПД цикла. Сравнить данный цикл с циклом Карно. Результаты расчетов свести в таблицы 10-1 П и 10-2 П..

Данные для расчета в таблице 10-3 П.

Таблица 10-1 П

Номер и параметры точек			
Точка	P, кПа	T, К	v, м ³ /кг
1			
2			
3			

4			
5			

Таблица 10-2 П

Характеристики процессов				Термический КПД	
процесс	вид процесса	работа ℓ , кДж/кг	теплота q , кДж/кг	цикла η_t , %	цикла Карно η_t^K , %
1 – 2					
2 – 3					
3 – 4					
4 - 5					
5 - 1					

Таблица 10-3 П

№ п/п	P_1 , мм рт. ст.	t_1 , °C	$\varepsilon = v_1/v_2$	$\lambda = P_3/P_2$	$\rho = v_4/v_3$
1	735	20	11,5	1,4	1,6
2	745	25	12,5	1,3	1,5
3	755	30	13	1,5	1,7
4	765	27	12,7	1,4	1,6
5	740	25	12	1,3	1,5
6	750	20	11,5	1,4	1,6
7	760	30	12	1,5	1,7
8	770	22	13	1,3	1,5
9	735	27	12,7	1,45	1,65
10	740	25	13	1,35	1,55
11	745	20	11,5	1,4	1,6
12	750	30	12,5	1,3	1,5
13	755	18	12,7	1,5	1,7
14	760	20	13	1,3	1,5
15	740	22	12	1,45	1,65
16	750	24	13	1,5	1,7
17	760	27	11,5	1,35	1,55
18	745	30	12	1,4	1,6
19	745	20	13	1,5	1,7
20	755	25	12,5	1,6	1,8

7.3. Задачи для самостоятельного решения

Задача 1.

К 1 м^3 воздуха, находящегося в цилиндре с подвижным поршнем, подводится при постоянном давлении 335 кДж теплоты. Объем воздуха при этом увеличивается до $1,5 \text{ м}^3$. Начальная температура воздуха 15°C . Определить массу, параметры после нагрева, совершенную газом работу расширения, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в данном процессе. Изобразить процесс в P-v- и T-s- диаграммах.

Задача 2.

Воздух адиабатно расширяется в цилиндре так, что его объем становится в 5 раз больше первоначального. Начальное давление 3 бар, температура 200°C . Масса газа 3 кг. Определить параметры газа после расширения, совершенную газом работу, теплоту, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в данном процессе. Изобразить процесс в P-v- и T-s- диаграммах.

Задача 3.

8 м^3 воздуха при давлении 0,9 бар и температуре 20°C сжимается изотермически до давления 8,1 бар. Определить массу газа, параметры воздуха в конце процесса, затраченную на сжатие работу, отводимую теплоту, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в данном процессе. Изобразить процесс в P-v- и T-s- диаграммах.

Задача 4.

Воздух изотермически сжимается при температуре 127°C , так что его объем становится равным $\frac{1}{4}$ от начального объема, а затем адиабатно расширяется до первоначального давления. Масса воздуха 10 кг. Начальное давление 1 бар. Определить параметры воздуха в конце процесса, затраченную на сжатие работу, теплоту, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в данном процессе. Изобразить процесс в P-v- и T-s- диаграммах.

Задача 5.

25 кг аммиака при температуре 27°C изотермически сжимается до тех пор, пока давление не становится равным 4,15 МПа. На сжатие затрачивается работа 8,0 МДж. Определить параметры газа в конце процесса, затраченную на сжатие работу, теплоту, измене-

ние внутренней энергии, энтальпии и энтропии в данном процессе. Изобразить процесс в P-v- и T-s- диаграммах.

Задача 6.

10 кг углекислого газа с начальным давлением 1 ат и температурой 15°C адиабатно сжимается в компрессоре до конечного давления 0,8 МПа. Определить параметры газа в начале и в конце процесса, затраченную на сжатие работу, теплоту, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в данном процессе. Изобразить процесс в P-v- и T-s- диаграммах.

Задача 7.

2 м^3 воздуха изобарно нагревается при избыточном давлении 2 бар от температуры 100°C до 500°C . Определить массу, параметры газа в начале и в конце процесса, работу, теплоту, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в данном процессе. Изобразить процесс в P-v- и T-s- диаграммах.

Задача 8.

Несколько кг воздуха изобарно нагревается при давлении 0,5 МПа, при этом его объем увеличивается от $0,35\text{ м}^3$ до $1,8\text{ м}^3$. Температура в конце процесса 1500°C . Определить массу, параметры газа в начале и в конце процесса, работу, теплоту, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в данном процессе. Изобразить процесс в P-v- и T-s- диаграммах.

Задача 9.

1 кг воздуха адиабатно расширяется от давления 4,5 бар до давления 1,2 бар, при этом охлаждается до температуры $t_2 = -45^{\circ}\text{C}$. Определить параметры газа в начале и в конце процесса, работу, теплоту, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в данном процессе. Изобразить процесс в P-v- и T-s- диаграммах.

Задача 10.

1 кг воздуха, занимающий объем $0,0887\text{ м}^3$ при давлении 10 бар, расширяется до увеличения объема в 10 раз. Определить конечные параметры газа при адиабатном и изотермическом расширении (т.е. сравнить конечные параметры газа для этих процессов). Определить работу, теплоту, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в изотермическом процессе. Изобразить оба процесса в P-v- и T-s- диаграммах.

Задача 11.

2,5 кг азота при температуре 640°C изобарно охлаждается при давлении 1,2 МПа до тех пор, пока объем его не уменьшится в два

раза. Определить параметры газа в начале и в конце процесса, работу, теплоту, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в данном процессе. Изобразить процесс в P-v- и T-s- диаграммах.

Задача 12.

7 кг азота с начальным давлением 740 мм рт.ст. и начальной температурой 5°C сжимается в компрессоре до конечного давления 0,8 МПа. Определить параметры газа в начале и в конце процесса, работу, теплоту, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в данном процессе. Изобразить процесс в P-v- и T-s- диаграммах. Сжатие считать адиабатным.

Задача 13.

При изотермическом расширении 0,25 кг кислорода в цилиндре поршневой машины давление снижается от 12,5 до 5,6 МПа, а поршень перемещается на 50мм. Диаметр цилиндра 220мм. Определить параметры газа в начале и в конце процесса, работу, теплоту, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в данном процессе. Изобразить процесс в P-v- и T-s- диаграммах.

Задача 14.

6,5 кг углекислого газа адиабатно сжимается в компрессоре от давления 750мм рт.ст. до давления 0,5МПа. Начальная температура газа 30°C . Определить параметры газа в начале и в конце процесса, работу, теплоту, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в данном процессе. Изобразить процесс в P-v- и T-s- диаграммах.

Задача 15.

В закрытом сосуде находится 6м^3 углекислого газа при давлении 0,2 МПа и температуре 37°C . Газ нагревается, пока давление не становится равным 0,3 МПа. Определить массу, параметры газа в начале и в конце процесса, работу, теплоту, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в данном процессе. Изобразить процесс в P-v- и T-s- диаграммах.

Задача 16.

10кг воздуха при давлении 1,2 бар и температуре 30°C изотермически сжимаются, при этом объем уменьшается в 2,5 раза. Определить параметры газа в начале и в конце процесса, работу, теплоту, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в данном процессе. Изобразить процесс в P-v- и T-s- диаграммах.

Задача 17.

40 кг азота нагревается при постоянном объеме от температуры 40°C до температуры 300°C , а затем изобарно охлаждается до первоначальной температуры. Начальное давление 760 мм рт.ст. Определить параметры газа в начале и в конце процессов, работу, теплоту, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в изохорном процессе. Изобразить процессы в P-v- и T-s- диаграммах.

Задача 18.

В газгольдере объемом 12 м^3 находится метан под давлением 1 МПа и при температуре 7°C . От солнечной радиации температура газа в течение дня повысилась на 20°C . Как возросло давление газа? Определить массу, параметры газа в начале и в конце процесса, работу, теплоту, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в данном процессе. Изобразить процесс в P-v- и T-s- диаграммах.

Задача 19.

В цилиндре с поршнем находится воздух под давлением 5 бар и температуре 400°C . Воздух изобарно охлаждается до температуры 0°C . Начальный объем газа 400 л. Определить массу, параметры газа в начале и в конце процесса, работу, теплоту, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в данном процессе. Изобразить процесс в P-v- и T-s- диаграммах.

Задача 20.

На изотермическое сжатие некоторого количества воздуха затрачивается работа 85 кДж. Начальные параметры воздуха: температура 27°C , давление 0,5 МПа. Давление при сжатии увеличивается в 4 раза. Определить массу воздуха, параметры газа в начале и в конце процесса, работу, теплоту, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в данном процессе. Изобразить процесс в P-v- и T-s- диаграммах.

Задача 21.

На адиабатное сжатие 3 кг кислорода затрачена работа 470 кДж. Начальные параметры газа: давление 1 бар, температура 15°C . Определить параметры газа в начале и в конце процесса, работу, теплоту, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в данном процессе. Изобразить процесс в P-v- и T-s- диаграммах.

Задача 22.

5 кг кислорода адиабатно расширяется, при этом его температура снижается от 25°C до -55°C . Конечное давление 1 бар. Определить параметры газа в начале и в конце процесса, работу, теплоту, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в данном процессе. Изобразить процесс в P-v- и T-s- диаграммах.

Задача 23.

В цилиндре двигателя внутреннего сгорания изобарно нагревается воздух, при этом его объем увеличивается в 2,2 раза. Начальные параметры газа: давление 1,2 ат., температура 500°C . Определить параметры газа в начале и в конце процесса, работу, теплоту, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в данном процессе. Изобразить процесс в P-v - и T-s- диаграммах. Принять массу газа 1 кг.

Задача 24.

1 кг воздуха, взятого при давлении 760мм рт.ст. и температуре 127°C , изотермически сжимается и его объем становится равным $\frac{1}{4}$ первоначального, а затем адиабатно расширяется до первоначального давления. Определить параметры газа в начале и в конце процессов, работу, теплоту, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в изотермическом процессе. Изобразить процессы в P-v- и T-s- диаграммах.

Задача 25.

К 1 м^3 азота, находящемуся в цилиндре со свободно движущимся поршнем, подводится при постоянном давлении 600 кДж теплоты, при этом объем увеличивается в 3 раза. Начальная температура газа 20°C . Определить массу, параметры газа в начале и в конце процесса, работу, теплоту, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в данном процессе. Изобразить процесс в P-v - и T-s- диаграммах.

Задача 26.

При изотермическом сжатии $2,1\text{ м}^3$ азота, взятого при давлении 1 бар и температуре 20°C , от газа отводится 335кДж теплоты. Определить массу, параметры газа в начале и в конце процесса, работу, теплоту, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в данном процессе. Изобразить процесс в P-v- и T-s- диаграммах.

Задача 27.

При изохорном нагреве 25 кг метана его температура повышается на 25° . Как изменится давление, если первоначальные показания манометра на баллоне, в котором находится газ, 1,2 ат. Начальная температура метана 12°C . Определить параметры газа в начале и в конце процесса, работу, теплоту, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в данном процессе. Изобразить процесс в P-v- и T-s- диаграммах.

Задача 28.

40 кг углекислого газа, взятого при нормальных физических условиях, нагревается изохорно до температуры 400°C . Определить параметры газа в начале и в конце процесса, работу, теплоту, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в данном процессе. Изобразить процесс в P-v- и T-s- диаграммах.

Задача 29.

10 кг азота, взятого при нормальных физических условиях, нагревается изобарно до температуры 900°C . Определить параметры газа в начале и в конце процесса, работу, теплоту, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в данном процессе. Изобразить процесс в P-v- и T-s- диаграммах.

Задача 30.

В газгольдере объемом $1,2 \text{ м}^3$ находится углекислый газ при температуре 18°C и избыточном давлении 5 ат. Как изменится давление в баллоне, если от солнечной радиации газ нагреется на 12° . Определить массу, параметры газа в начале и в конце процесса, работу, теплоту, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в данном процессе. Изобразить процесс в P-v- и T-s- диаграммах.

Список литературы

1. Литвин, А.М. Техническая термодинамика: учеб. пособие / А.М. Литвин. -2-е изд., перераб. и доп. –М. -Л.: Гос. энергет. изд-во, 1973.- 388 с.
2. Теплотехника: учебник для техн. спец. вузов/ под ред. В.И. Крутова. -М.: Машиностроение, 1986. - 426 с.
3. Нащокин, В.В. Техническая термодинамика и теплопередача: учеб. пособие / В.В. Нащокин. -3-е изд., испр. и доп. -М.: Высш. шк., 1980.- 472 с.
4. Чечеткин, А.В. Теплотехника: учебник / А.В. Чечеткин, Н.А. Занемонец. - М.: Высш. шк., 1986. - 344 с.
5. Теплотехника: учебник / под ред. А.П. Баскакова. - 2-е изд., перераб. -М.: Энергоатомиздат, 1991. - 224 с.
6. Рабинович, О.М. Сборник задач по технической термодинамике: учеб. пособие для техникумов / О.М. Рабинович. - 5-е изд., перераб. - М.: Машиностроение, 1973. - 344 с.
7. Рипс, С.М. Основы термодинамики и теплотехники / С.М. Рипс. - М.: Высш. шк., 1968. - 344 с.
8. Кириллин, В.А. и др. Техническая термодинамика: учебник/ В.А. Кириллин, В.В. Сычев, А.Е. Шейндлин. - 4-е изд., перераб. -М.: Энергоатомиздат, 1983. - 416 с.
9. Ларииков, Н.Н. Теплотехника: учебник для вузов. / Н.Н. Ларииков. -3-е изд., перераб. и доп.- М.: Стройиздат, 1985.- 432 с.
10. Вукалович, М.П. Термодинамические свойства воды и водяного пара: учеб. пособие для вузов / М.П. Вукалович. - 5-е изд. -М.: Машгиз, 1955. -89с.

Приложение. Таблица 1П

Молекулярные массы, плотности при нормальных условиях и характеристические газовые постоянные газов.

Вещество	Химическое обозначение	Молекулярная масса, кг/кмоль	ρ , кг/м ³	R, ж/(кг·К)
Воздух (сухой)	-	28,96	1,293	287,0
Кислород	O ₂	32,00	1,429	259,8
Азот	N ₂	28,026	1,251	296,8
Гелий	He	4,003	0,179	2078,0
Аргон	Ar	39,994	1,783	208,2
Водород	H ₂	2,016	0,090	4124,0
Окись углерода	CO	28,01	1,250	296,8
Двуокись углерода	CO ₂	44,01	1,977	188,9
Сернистый газ	SO ₂	64,06	2,926	129,8
Метан	CH ₄	16,032	0,717	518,8
Неон	Ne	20,183	0,8999	411,93
Этилен	C ₂ H ₄	28,052	1,251	296,6
Коксовый газ	-	11,50	0,515	721,0
Аммиак	NH ₃	17,032	0,771	488,3
Водяной пар	H ₂ O	18,016	(0,804)	(461)
Окись азота	NO	30,008	1,34	277,06
Сернистый ангидрид	SO ₃	80,06	3,575	103,85
Сероводород	H ₂ S	34,08	1,539	243,96
Фтор	F ₂	38,00	1,695	218,79
Хлор	Cl ₂	70,91	3,22	117,24

Приложение. Таблица 2П

Интерполяционные формулы для средних массовых и объемных теплоемкостей газов

Газ	Массовая теплоемкость, кДж/(кг·К)	Объемная теплоемкость, кДж/(м ³ ·К)
В пределах от 0 до 1000 °С		
O ₂	$c_p = 0,9127 + 0,00012724 \cdot t$	$c_p = 1,3046 + 0,00018183 \cdot t$
	$c_v = 0,6527 + 0,00012724 \cdot t$	$c_v = 0,9337 + 0,00018183 \cdot t$
N ₂	$c_p = 1,0258 + 0,00008382 \cdot t$	$c_p = 1,2833 + 0,00010492 \cdot t$
	$c_v = 0,7289 + 0,00008382 \cdot t$	$c_v = 0,9123 + 0,00010492 \cdot t$
CO	$c_p = 1,0304 + 0,00009575 \cdot t$	$c_p = 1,2883 + 0,00011966 \cdot t$
	$c_v = 0,7335 + 0,00009575 \cdot t$	$c_v = 0,9173 + 0,00011966 \cdot t$
Воздух	$c_p = 0,9952 + 0,00009349 \cdot t$	$c_p = 1,2870 + 0,00012091 \cdot t$
	$c_v = 0,7084 + 0,00009349 \cdot t$	$c_v = 0,9161 + 0,00012091 \cdot t$
H ₂ O	$c_p = 1,8401 + 0,00029278 \cdot t$	$c_p = 1,4800 + 0,00023551 \cdot t$
	$c_v = 1,3783 + 0,00029278 \cdot t$	$c_v = 1,1091 + 0,00023551 \cdot t$
SO ₂	$c_p = 0,6314 + 0,00015541 \cdot t$	$c_p = 1,8472 + 0,00004547 \cdot t$
	$c_v = 0,5016 + 0,00015541 \cdot t$	$c_v = 1,4763 + 0,00004547 \cdot t$
В пределах от 0 до 1500 °С		
H ₂	$c_p = 14,2494 + 0,00059574 \cdot t$	$c_p = 1,2803 + 0,00005355 \cdot t$
	$c_v = 10,1241 + 0,00059574 \cdot t$	$c_v = 0,9094 + 0,00005355 \cdot t$
CO ₂	$c_p = 0,8725 + 0,00024053 \cdot t$	$c_p = 1,7250 + 0,00004756 \cdot t$
	$c_v = 0,6837 + 0,00024053 \cdot t$	$c_v = 1,3540 + 0,00004756 \cdot t$

Основные формулы для расчета термодинамических процессов идеальных газов

Название процесса	Показатель политропы n	Уравнение процесса	Зависимость параметров	Изменение внутренней энергии $\Delta u = C_v(T_2-T_1)$
Изохорный	$+\infty - \infty$	$V = \text{const}$	$P_1/P_2 = T_1/T_2$	$C_v(T_2-T_1)$
Изобарный	0	$P = \text{const}$	$v_1/v_2 = T_1/T_2$	$C_p(T_2-T_1)$
Изотермический	ℓ	$P V = \text{const}$	$P_1/P_2 = v_2/v_1$	0
Адиабатный	k	$P V^k = \text{const}$	$P_1/P_2 = (v_2/v_1)^k$ или $P V^k = \text{const}$ $T_1/T_2 = (v_2/v_1)^{k-1}$ $T_1/T_2 = (P_1/P_2)^{(k-1)/k}$ или $T V^{k-1} = \text{const}$ $TP^{(1-k)/k} = \text{const}$	$\Delta u + \ell = 0$ $C_v(T_2-T_1)$
Политропный	$n = +\infty \div -\infty$	$P V^n = \text{const}$	$TP^{(1-n)/n} = \text{const}$ $P V^n = \text{const}$ $T V^{n-1} = \text{const}$	$C_v(T_2-T_1)$

Название процесса	Работа расширения (сжатия) ℓ	Теплота q	Изменение энтальпии $\Delta i = C_p(T_2-T_1)$	Изменение энтропии Δs
Изохорный	0	$q = \Delta u = C_v(T_2-T_1)$	$C_p(T_2-T_1)$	$C_v \ln(T_2/T_1)$
Изобарный	$P(v_2-v_1) = R(T_2-T_1)$	$q = \Delta i = C_p(T_2-T_1)$	$C_p(T_2-T_1)$	$C_p \ln(T_2/T_1)$
Изотермический	$RT \ln(v_2/v_1) = RT \ln(P_1/P_2)$	$q = \ell = RT \ln(v_2/v_1) = RT \ln(P_1/P_2)$	0	$R \ln(v_2/v_1) = -R \ln(P_1/P_2)$
Адиабатный	$\frac{1}{k-1} (P_1 v_1 - P_2 v_2) = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2)$	0	$C_p(T_2-T_1)$	0
Политропный	$\frac{1}{n-1} (P_1 v_1 - P_2 v_2) = \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2)$	$C_v(T_2-T_1)$	$C_p(T_2-T_1)$	$C_v \ln(T_2/T_1)$

Шадрина Елена Михайловна
Кувшинова Анастасия Сергеевна

Техническая термодинамика и теплотехника

Учебное пособие

«Термодинамические процессы идеальных газов»

Редактор В.Л. Родичева

Подписано в печать 16.01.2011. Формат 60x84 1/16. Бумага писчая.

Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 300 экз. Заказ

ГОУ ВПО Ивановский государственный
химико-технологический университет

Отпечатано на полиграфическом оборудовании
кафедры экономики и финансов ГОУ ВПО «ИГХТУ»

153000, г. Иваново, пр. Ф. Энгельса, 7