

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. – 84 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.

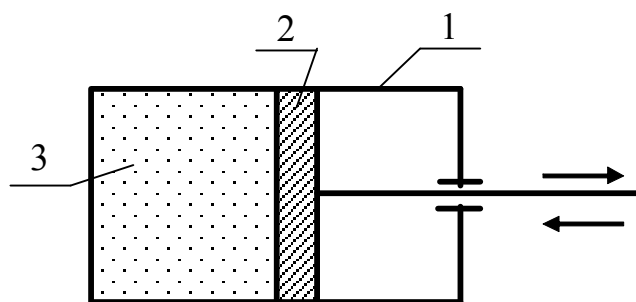


Рис.1.1. Цилиндр с поршнем:

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-

А

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,  $\text{м}^3$ ;  $m$  – масса вещества,  $\text{кг}$ .

**Плотность** - масса единицы объема, обратно пропорциональна удельному объему:

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

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

Объем в «СИ» измеряется в кубических метрах ( $\text{м}^3$ ).

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

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

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

где  $\Psi$  - сила,  $\text{Н}$ ;  $F$  – площадь поверхности,  $\text{м}^2$ ;  $P$  – давление,  $\text{Па}$ .

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

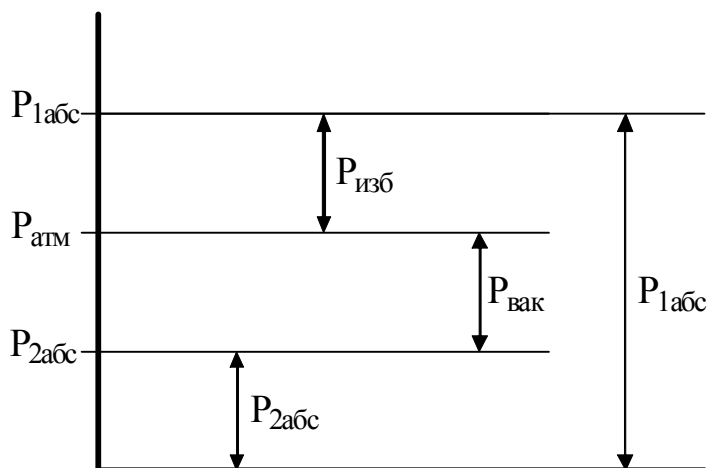
Если давление в сосуде превышает атмосферное, то:

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

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.



$$\begin{aligned} P_{1 \text{ абс}} &> P_{\text{атм}} \\ P_{2 \text{ абс}} &< P_{\text{атм}} \end{aligned}$$

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  $0^{\circ}\text{C}$ , температура кипения воды принята за  $100^{\circ}\text{C}$ . 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.