

**Филиал МГТУ**  
**Майкопский государственный технологический университет**  
**п. Яблоновский**

**Учебно-методическое пособие**

**Расчетная работа**  
**по дисциплине**  
**Термодинамика и теплопередача**

**п. Яблоновский 2022 г.**

УДК 536.24(07)  
ББК 22.317  
Р 24

Автор: Бебко Д.А.

Расчетная работа по дисциплине «Термодинамика и теплопередача»:

Учебно-методическое пособие. – п. Яблоновский:, 2021. – 70 с.

**по дисциплине Б1.О.23 Термодинамика и теплопередача**  
**по направлению подготовки бакалавров 21.03.01 Нефтегазовое дело**  
**по профилю подготовки Эксплуатация и обслуживание объектов**  
**транспорта и хранения нефти, газа и продуктов переработки**  
**квалификация (степень) выпускник Бакалавр**

В данных методических указаниях предложены задания к контрольной работе, дан справочный материал и практические рекомендации по ее выполнению, а также примеры решения задач.

Методические указания предназначены для студентов очной и заочной формы обучения.

## СОДЕРЖАНИЕ

Рекомендации по оформлению контрольной работы	4
Основные понятия и определения термодинамики	5
Параметры состояния рабочего тела»	6
Идеальный газ. Основные законы идеального газа	9
Смеси газов	10
Теплоемкость газов	11
Внутренняя энергия	13
Теплота	13
Работа	14
Первый закон термодинамики	14
Энтальпия газов	15
Основные термодинамические процессы	15
Второй закон термодинамики	20
Энтропия идеального газ	22
Водяной пар. Процессы водяного пара	23
Круговые процессы. Цикл Карно	30
Истечение газов и паров. Дросселирование	32
Циклы поршневых компрессоров, ДВС и ГТУ	37
Циклы паросиловых и холодильных установок	42
Термодинамика газовых циклов	47
Примеры решения задач	50
Задания контрольной работы	60
Приложения	67

### **Рекомендации по оформлению контрольной работы**

При выполнении контрольной работы целесообразно руководствоваться следующими правилами.

1. Контрольная работа выполняется в обычной тетради или формате А4 в текстовой программе Word и передается на электронном носителе или пересылается по электронной почте. Для замечаний рецензента на страницах тетради оставляются поля. Каждая следующая задача должна начинаться с новой страницы. Условия задач переписываются полностью без сокращений.

2. Внимательно прочитать условие задачи, уяснить, какой физический процесс или явление в ней рассматриваются.

3. Записать условие задачи в сокращенном виде, применяя общепринятые обозначения физических величин. При решении задач следует пользоваться Международной системой единиц (СИ). Все числовые величины должны быть приведены к этой системе. Следует проанализировать, все ли данные, необходимые для решения задачи, приведены в её условии. Недостающие данные надо взять из справочных таблиц.

4. Задачу следует обязательно пояснять чертежом или рисунком (если это возможно), выполняя их аккуратно с помощью чертежных принадлежностей. Обозначения на чертеже и в пояснениях решений должны быть одинаковыми.

5. Решение задачи должно сопровождаться пояснениями. В пояснениях необходимо указывать те основные законы и формулы, на которых базируется решение задачи.

6. Как правило, задача решается сначала в общем виде, то есть выводится формула, в которой искомая величина выражена через величины, заданные в условии задачи.

7. Получив решение в общем виде, сделать анализ его размерности. Для этого подставить в правую часть полученной рабочей формулы вместо символов величин обозначения единиц измерений, провести с ними необходимые действия и убедиться в том, что полученная при этом единица соответствует искомой величине.

8. Произвести вычисления путем подстановки заданных числовых величин в расчетную формулу. Все вычисления рекомендуется выполнять с помощью микрокалькулятора. При вычислениях соблюдать правила приближенных вычислений и округлений.

## Основные понятия и определения термодинамики

*Термодинамическая система* – совокупность материальных тел, обменивающихся энергией друг с другом, и с окружающей средой.

Объект термодинамического исследования называется *системой*, а все, что не включено в систему, но может взаимодействовать с ней, называется *окружающей средой*.

Пример ТД системы – газ, находящийся в цилиндре с поршнем. Окружающая среда – цилиндр и поршень, воздух, который окружает их, стены помещения, где находится цилиндр с поршнем.

В технической термодинамике изучаются системы, осуществляющие взаимное превращение теплоты и работы. Обычно это газы и пары. Их называют *рабочими телами*.

*Рабочее тело* – макроскопическое тело, состоящее из большого числа частиц, т.е. это вещества, изменяющие свой объем в процессе подвода и отвода тепла.

*Открытая ТД система* – система, которая может обмениваться со средой веществом. Примеры открытых систем – потоки газа или пара в трубопроводах.

*Закрытая (замкнутая) система* – система, не обменивающаяся с внешней средой ни энергией, ни веществом.

*Теплоизолированная (адиабатная) система* – система, которая не может обмениваться теплом с окружающей средой. Пример адиабатной системы – газ, находящийся в сосуде, стенки которого покрыты идеальной тепловой изоляцией, исключающей теплообмен между заключенным в сосуде газом и окружающими телами.

*Однородная система* – система, имеющая во всех своих частях одинаковый состав и физические свойства.

*Гомогенная система* – однородная система, внутри которой нет поверхностей раздела (лед, вода, газы).

*Гетерогенная система* – система, состоящая из нескольких макроскопических частей, с различными физическими свойствами, отделенных одна от другой поверхностями раздела (лед и вода, вода и пар).

*Фазы* – гомогенные части системы, отделенные от остальных частей поверхностями раздела.

Вещество может находиться в трех состояниях – *твердом, жидком и газообразном*. Наиболее удобным является *газообразное*, так как в этом состоянии тело обладает наибольшей способностью к расширению при нагревании (при расширении совершается работа).

*Термодинамический процесс* – совокупность изменений состояния ТД системы при переходе из одного равновесного состояния в другое.

*Равновесное состояние* – состояние, при котором во всех точках его объема давление, температура и удельный объем одинаковы. Если процесс проходит через равновесное состояние, то он называется *равновесным* (теплообмен, диффузия).

*Неравновесные процессы* – процессы, при протекании которых система не находится в состоянии равновесия. Например, при быстром расширении газа в цилиндре под поршнем или при быстром сжатии газа температура и давление в различных точках объема рабочего тела не одинаковы, то есть находятся в неравновесном состоянии.

В термодинамике различают следующие процессы: изобарные, изохорные, изотермические, адиабатные и политропные.

*Замкнутый (круговой) процесс* – процесс, при котором система возвращается в исходное состояние (используется для анализа работы тепловых двигателей и машин).

Свойства вещества могут быть *интенсивными и экстенсивными*.

*Интенсивные свойства* – свойства, не зависящие от количества вещества в системе (давление, температура).

*Экстенсивные свойства* – свойства, зависящие от количества вещества. Пример экстенсивных свойств – объем, который изменяется в данных условиях пропорционально количеству вещества: объем 10 кг вещества будет в 10 раз больше, чем объем 1 кг. Интенсивные свойства, определяющие состояние тела или группы тел (термодинамической системы) – называют *термодинамическими параметрами состояния тела (системы)*.

### Параметры состояния рабочего тела

Величины, характеризующие тело в данном состоянии, называют *параметрами состояния*. Чаще всего состояние тела определяется следующими параметрами: *удельным объемом, давлением и температурой*.

**Удельный объем** ( $v$ ) тела представляет собой объем единицы его массы. В технической термодинамике за единицу массы принимают килограмм (кг), за единицу объема – кубический метр ( $\text{м}^3$ ). Следовательно, удельный объем равен объему в кубических метрах одного килограмма вещества.

Если  $V$  – объем в  $\text{м}^3$ , занимаемый телом массой  $m$  в кг, то удельный объем

$$v = \frac{V}{m}, \text{ м}^3/\text{кг} \quad (1)$$

Величина, обратная удельному объему представляет собой массу единицы объема и носит название *плотности*

$$\rho = \frac{m}{V}, \text{ кг}/\text{м}^3 \quad (2)$$

Таким образом, удельный объем измеряют в  $\text{м}^3/\text{кг}$ , а плотность – в  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Из уравнения (2) следует, что

$$v\rho = 1$$

**Давление**  $p$  в Международной системе единиц (СИ) измеряют в паскалях. Паскаль (Па) – давление, вызываемое силой 1 ньютон (Н), равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью  $1 \text{ м}^2$ .

1 Ньютон – сила, сообщаящая телу массой 1 кг ускорение  $1 \text{ м}/\text{с}^2$  в направлении действия силы. Таким образом, в единицах СИ паскаль измеряют в ньютонах на квадратный метр ( $\text{Н}/\text{м}^2$ ). Во всех термодинамических уравнениях пользуются этой единицей, поэтому в формулы следует подставлять числовые значения давления в паскалях. Так как эта единица очень мала, ею пользуются только при измерении незначительных давлений. Следовательно,  $1 \text{ кПа} = 10^3 \text{ Па} = 10^3 \text{ Н}/\text{м}^2$ ;  $1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па} = 10^6 \text{ Н}/\text{м}^2$ .

Давление можно также измерять высотой столба жидкости (ртути, воды, спирта и др.), уравновешивающего давление газа (воздуха). На рис. 1 изображен сосуд с газом, к которому припаяна изогнутая трубка, наполненная какой-либо жидкостью.

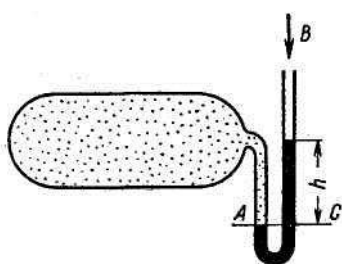


Рис. 1

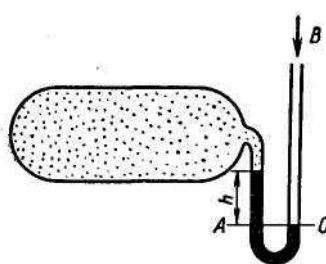


Рис. 2

Если давление в сосуде больше атмосферного (барометрического), то жидкость в правом колене трубки поднимается; если же оно ниже, то жидкость поднимается в левом колене (рис. 2).

В табл. 1 приводятся соотношения между единицами измерения давления технической системы и единицами системы СИ.

Таблица 1 -Соотношения между единицами давления

Единицы измерений	Па	бар	мм рт. ст.
Паскаль.....	1	$10^{-5}$	$7,5024 \cdot 10^{-3}$
Бар.....	$10^5$	1	$7,5024 \cdot 10^2$
Мм рт.ст.....	133,322	$1,33322 \cdot 10^{-3}$	1
Мм вод.ст.....	9,8067	$9,8067 \cdot 10^{-5}$	$7,35 \cdot 10^{-2}$
Кгс/см <sup>2</sup> .....	$9,8067 \cdot 10^4$	0,98067	$7,35 \cdot 10^2$

Единицы измерений	мм вод. ст.	кгс/см <sup>2</sup>	
Паскаль.....	0,102	$1,02 \cdot 10^{-5}$	
Бар.....	$1,02 \cdot 10^4$	1,02	
Мм рт.ст.....	13,6	$1,36 \cdot 10^{-3}$	
Мм вод.ст.....	1	$10^{-4}$	
Кгс/см <sup>2</sup> .....	$10^4$	1	

Коэффициенты пересчета, приведенные в табл. 1, даны с большой точностью. В практических расчетах можно использовать их округленные значения.

Для измерения давления применяют *барометры*, *манометры* и *вакуумметры*.

*Барометрами* измеряют атмосферное давление, *манометры* служат для измерения давления выше атмосферного. Их показания дают избыток давления измеряемой среды над атмосферным давлением - манометрическое ( $p_{\text{ман}}$ ) или избыточное ( $p_{\text{изб}}$ ) давление.

В термодинамике параметром состояния рабочего тела является только *абсолютное давление*.

Абсолютное давление определяют из соотношения

$$p_{\text{абс}} = p_{\text{ман}} + B, \quad (3)$$

где  $B$  - атмосферное (барометрическое) давление.

*Вакуумметры* служат для измерения давления ниже атмосферного. По их показаниям судят, насколько давление рассматриваемой среды меньше атмосферного (вакуум, разрежение). Абсолютное давление в этом случае находят из равенства

$$p_{\text{абс}} = B - p_{\text{вак}}. \quad (4)$$

**Температура** характеризует степень нагретости тела. Ее измеряют или по *термодинамической температурной шкале*, или по *международной практической*

*температурной шкале.* Единицей термодинамической температуры является кельвин (К), представляющий собой 1/273,16 часть термодинамической температуры тройной точки воды. Эта температура равна 273,16 К и является единственной воспроизводимой опытным путем постоянной точкой термодинамической температурной шкалы (реперная точка).

Тройная точка воды - это температура, при которой все три фазы воды (твердая, жидкая, газообразная) находятся в равновесии. Нижним пределом шкалы является *абсолютный нуль*. Термодинамическую температурную шкалу называют также *абсолютной шкалой*. Параметром состояния рабочего тела является абсолютная температура, обозначаемая символом Т и измеренная в кельвинах (К).

Термодинамическая температура связана с температурой в градусах Цельсия соотношением

$$T = t^{\circ}\text{C} + 273,15 \quad (5)$$

В США и Англии для измерения температуры применяют шкалу Фаренгейта. Для перевода показаний этой шкалы в °С и обратно служат соотношения

$$t^{\circ}\text{C} = 5/9 (t^{\circ}\text{F} - 32^{\circ}). \quad (6)$$

$$t^{\circ}\text{F} = 9/5 t^{\circ}\text{C} + 32^{\circ}. \quad (7)$$

В настоящее время применяют различные температурные шкалы-Цельсия. Реомюра, Фаренгейта, Ренкина, соотношения между которыми приводятся в таблице 2

Таблица 2 Соотношение между различными температурными шкалами.

Наименование шкалы	Шкала Цельсия	Шкала Ренкина	Шкала Фаренгейта	Шкала Реомюра
1	2	3	4	5
Шкала Цельсия	-	$0,55 \cdot T^{\circ}\text{Ra} - 273,15$	$(t^{\circ}\text{F} - 32) / 1,8$	$1,25 \cdot t^{\circ}\text{R}$
Шкала Ренкина	$1,8 \cdot (t^{\circ}\text{C} + 273,15)$	-	$t^{\circ}\text{F} + 459,67$	$1,8 (1,25 t^{\circ}\text{R} + 273,15)$
Шкала Фаренгейта	$1,8 \cdot t^{\circ}\text{C} + 32$	$T^{\circ}\text{Ra} - 459,67$	-	$2,8 t^{\circ}\text{R} + 32$
Шкала Реомюра	$0,8 \cdot t^{\circ}\text{C}$	$0,8 \cdot (0,55^{\circ}\text{Ra} - 273,15)$	$0,44 (t^{\circ}\text{F} - 32)$	-

**Количество вещества** — число структурных элементов (молекул, атомов, ионов и т. п), содержащихся в системе или теле. Количество вещества выражается в молях. Моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг.

Количество вещества тела (системы)

$$n = N / N_A$$

где N — число структурных элементов (молекул, атомов, ионов и т.п.), составляющих тело (систему);  $N_A$  — постоянная Авогадро:

$$N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

**Молярная масса вещества**

$$M = m / n,$$



где  $m$  — масса однородного тела (системы);  $n$  — количество вещества этого тела.

### Идеальный газ. Основные законы идеального газа.

Под *идеальным газом* понимают воображаемый газ, в котором отсутствуют силы притяжения между молекулами, а собственный объем молекул исчезающе мал по сравнению с объемом междумолекулярного пространства. Таким образом, молекулы идеального газа принимают за материальные точки. В действительно существующих газах при высоких температурах и малых давлениях можно пренебречь силами притяжения и объемом самих молекул. Поэтому такие газы можно также считать идеальными.

В тех газах, которые находятся в состояниях, достаточно близких к сжижению, нельзя пренебречь силами притяжения между молекулами и объемом последних. Такие газы нельзя отнести к идеальным, и их называют *реальными газами*.

*Основные газовые законы.*

1. Закон Бойля – Мариотта устанавливает зависимость между удельным объемом и абсолютным давлением идеального газа в процессе при постоянной температуре.

*«При постоянной температуре объем, занимаемый идеальным газом, изменяется обратно пропорционально его давлению»*

или

*«При постоянной температуре произведение удельного объема на давление есть величина постоянная».*

$$p \cdot v = \text{const}, \quad \frac{v_1}{v_2} = \frac{p_2}{p_1} \quad (T = \text{const})$$

2. Закон Гей-Люссака устанавливает зависимость между удельным объемом и абсолютной температурой при постоянном давлении.

*«При постоянном давлении объемы одного и того же количества идеального газа изменяются прямо пропорционально абсолютным температурам»*

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad \text{при } (p = \text{const}).$$

3. Закон Шарля устанавливает зависимость давления газа от его температуры при постоянном удельном объеме.

*«При постоянном объеме давление газа изменяется прямо пропорционально его абсолютной температуре»*

$$p / T = \text{const}, \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}, \quad \text{при } v = \text{const}$$

Закон Авогадро: *«При одинаковых температурах и давлениях в равных объемах различных идеальных газов содержится одинаковое количество молекул».*

*Нормальные условия для газов:*

$p = 101\,325 \text{ Па}$  и  $T = 273,15 \text{ К}$  (760 мм рт. ст. и  $0^\circ \text{ C}$ ).

*Объем 1 кмоль всех идеальных газов равен  $22,4136 \text{ м}^3/\text{кмоль}$  при нормальных условиях.*

Плотность газа при нормальных условиях определяется из равенства

$$\rho_n = M / 22,4 \text{ кг/м}^3$$

Пользуясь этой формулой, можно найти удельный объем любого газа при нормальных условиях:

$$\nu_H = 22,4 / M, \text{ м}^3/\text{кг}$$

Характеристическое уравнение идеального газа или *уравнение состояния* (уравнение Клапейрона - Менделеева) связывает между собой основные параметры состояния — давление, объем и температуру:

$$p \cdot V = \frac{m}{M} R \cdot T;$$

$$p \cdot V = n R \cdot T,$$

где  $p$  - давление газа;

$V$  - объем газа;

$n$  – количество вещества

$m$  - масса газа в кг;

$M$  – молярная масса;

$R = 8.31 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  – универсальная газовая постоянная;

Также в технической термодинамике часто используют *удельную газовую постоянную*:

$$R_0 = \frac{R}{M}$$

Тогда уравнение состояния примет вид:

$$pV = mR_0T$$

### Смеси газов

В технике используются газообразные вещества, близкие по свойствам к идеальным газам и представляющие механическую смесь отдельных газов. Например, доменный газ, отходящие газы из котельных установок, ДВС, реактивных двигателей, воздух, состоящий из азота, кислорода, углекислого газа, водяного пара и одноатомных газов.

*Газовая смесь* – смесь отдельных газов, не вступающих между собой ни в какие химические реакции.

Молекулы газа создают давление на стенки сосуда, которое называется *парциальным*.

*Парциальное давление* - это давление, которое имел бы каждый газ, входящий в состав смеси, если бы этот газ находился один в том же количестве, в том же объеме и при той же температуре, что и в смеси.

Состав газовой смеси определяется количеством каждого из газов, входящих в смесь, и может быть задан массовыми или объемными долями.

*Массовая доля* определяется отношением массы отдельного газа, входящего в смесь, к массе всей смеси:

$$\omega_1 = m_1 / m_{см}, \quad \omega_2 = m_2 / m_{см}, \quad \omega_3 = m_3 / m_{см}, \quad \dots, \quad \omega_n = m_n / m_{см},$$

где  $m_1, m_2, m_3, \dots, m_n$  — массы отдельных газов и  $m_{см}$  — масса всей смеси.

*Молярной долей* газа называют отношение количества вещества каждого компонента, входящего в смесь, к количеству вещества всей газовой смеси:

$$x_1 = n_1 / n_{см}, \quad x_2 = n_2 / n_{см}, \quad x_3 = n_3 / n_{см}, \quad \dots, \quad x_n = n_n / n_{см},$$

*Объемной долей* газа называют отношение объема каждого компонента, входящего в смесь, к объему всей газовой смеси при условии, что объем каждого компонента отнесен к давлению и температуре смеси (приведенный объем):

$$r_1 = \frac{V_1}{V}, r_2 = \frac{V_2}{V}, r_3 = \frac{V_3}{V}, \dots, r_n = \frac{V_n}{V},$$

где  $V_1, V_2, V_3, V_n$  — приведенные объемы компонентов газов, входящих в смесь;  $V$  — общий объем газовой смеси.

Очевидно, что

$$m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n = m;$$

$$\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \dots + \omega_n = 1,$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n = 1$$

а также

$$V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n = V;$$

$$r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_n = 1$$

Молярная масса смеси

$$M_{\text{см}} = \sum r_i M_i, M_{\text{см}} = \sum x_i M_i$$

или через массовый состав

$$M_{\text{см}} = \frac{1}{\sum \frac{\omega_i}{M_i}}$$

Связь между давлением газовой смеси и парциальными давлениями отдельных компонентов, входящих в смесь, устанавливается следующей зависимостью - *закон Дальтона*: «Общее давление смеси газов равно сумме парциальных давлений отдельных газов, составляющих смесь», легко получаемой из основного уравнения кинетической теории газов:

$$p_{\text{см}} = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n,$$

где  $p_{\text{см}}$  — общее давление газовой смеси;

$p_1, p_2, \dots, p_n$  — парциальные давления отдельных компонентов, входящих в смесь.

### Теплоемкость газов

**Теплоемкостью** называют количество теплоты, которое необходимо сообщить телу (газу), чтобы повысить температуру какой-либо количественной единицы на  $1^\circ \text{C}$ .

За единицу количества энергии в системе СИ применяют джоуль (Дж). В системе СИ джоуль является универсальной единицей, применяемой для измерения всех видов энергии: тепловой, механической, лучистой и пр. В качестве тепловой единицы 1 Дж представляет собой такое ее количество, которое появляется в результате превращения механической работы 1 Дж в теплоту. В качестве единицы механической энергии джоуль представляет собой работу, совершаемую силой, равной 1 ньютоном при перемещении ею тела на расстояние 1 м в направлении действия силы ( $1 \text{ Дж} = \text{Н} \cdot \text{м} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2$ ).

В зависимости от выбранной количественной единицы вещества различают молярную теплоемкость  $c_m$  — кДж/(моль·К), удельную теплоемкость  $c$  — кДж/(кг·К) и объемную теплоемкость  $c'$  — кДж/(м³·К).

Как было указано выше,  $1 \text{ м}^3$  газа в зависимости от параметров его состояния имеет разные массы. В связи с этим объемную теплоемкость всегда относят к массе газа, заключенной в  $1 \text{ м}^3$  его при нормальных условиях ( $p_n = 101\,325 \text{ Па}$  (760 мм рт. ст.) и  $T_n = 273 \text{ К}$  ( $t_n = 0^\circ \text{C}$ )).

Для определения значений перечисленных выше теплоемкостей достаточно знать величину одной какой-либо из них. Удобнее всего иметь величину молярной теплоемкости. Тогда удельная теплоемкость

$$c = c_m / M$$

Теплоемкость газа зависит от его температуры. По этому признаку различают *среднюю и истинную теплоемкость*.

Если  $q$  — количество теплоты, сообщаемой единице количества газа (или отнимаемого от него) при изменении температуры газа от  $t_1$  до  $t_2$  (или, что то же, от  $T_1$  до  $T_2$ ), то

$$\bar{c} = \frac{q}{t_2 - t_1}$$

представляет собой *среднюю теплоемкость* в пределах  $t_1 - t_2$ . Предел этого отношения, когда разность температур стремится к нулю, называют *истинной теплоемкостью*.

Аналитически последняя определяется как  $c = \frac{dq}{dt}$

Теплоемкость идеальных газов зависит не только от их температуры, но и от их атомности и характера процесса. Теплоемкость реальных газов зависит от их природных свойств, характера процесса, температуры и давления.

Для газов особо важное значение имеют следующие два случая нагревания (охлаждения):

- 1) изменение состояния при постоянном объеме;
- 2) изменение состояния при постоянном давлении.

Обоим этим случаям соответствуют различные значения теплоемкостей.

Таким образом, различают истинную и среднюю теплоемкости:

- а) молярную — при постоянном объеме ( $c_{mv}$  и  $\bar{c}_{mv}$ ) и постоянном давлении ( $c_{mp}$  и  $\bar{c}_{mp}$ );
- б) удельную — при постоянном объеме ( $c_v$  и  $\bar{c}_v$ ) и постоянном давлении ( $c_p$  и  $\bar{c}_p$ );
- в) объемную — при постоянном объеме ( $c'_v$  и  $\bar{c}'_v$ ) и постоянном давлении ( $c'_p$  и  $\bar{c}'_p$ ).

Истинные удельные теплоемкости при постоянной объеме и постоянном давлении соответственно равны

$$c_v = \frac{i}{2} \frac{R}{M}, \quad c_p = \frac{i+2}{2} \frac{R}{M}.$$

Уравнение Майера  $C_p -$

$$C_v = R$$

В технической термодинамике большое значение имеет отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме, обозначаемое буквой  $k$  — *показатель адиабаты*:

$$k = \frac{C_{mp}}{C_{mv}} = \frac{C_p}{C_v}$$

Теплоемкость газов изменяется с изменением температуры, причем эта зависимость имеет криволинейный характер.

### Теплоемкость газовой смеси

Удельная

$$c_{cm} = \sum_{i=1}^n \omega_i c_i$$

Объемная

$$c'_{cm} = \sum_{i=1}^n r_i c'_i$$

Молярная

$$C_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n x_i C_{m_i}$$

### Внутренняя энергия

*Внутренняя энергия* – это вся энергия, заключенная в теле или системе тел.

Внутренняя энергия включает в себя:

1. кинетическую энергию поступательного, вращательного и колебательного движения частиц;
2. потенциальную энергию взаимодействия частиц;
3. энергию электронных оболочек атомов;
4. внутриядерную энергию.

Таким образом, *внутренняя энергия* – энергия хаотического движения молекул и атомов, включающая энергию поступательного, вращательного и колебательного движений, потенциальную энергию сил взаимодействия между молекулами.

*Внутренняя энергия* является функцией состояния тела, то есть любых двух независимых параметров, определяющих это состояние:

$$U = m u, \text{ (Дж, кДж)}$$

$$U = \varphi_1(p, V); U = \varphi_2(p, T); U = \varphi_3(V, T)$$

Величина

$$u = U / M, \text{ Дж/кг}$$

называется *удельной внутренней энергией* и представляет собой *внутреннюю энергию единицы массы вещества*.

Для идеального газа внутренняя энергия определяется только температурой, т. к. молекулы газа не обладают потенциальной энергией сил сцепления, т.е.  $u = f(t)$ .

Внутреннюю энергию идеального газа можно определить по формуле

$$U = \frac{i}{2} m R_0 T$$

где  $i$  – число степеней свободы молекул газа

$i = 3$  – газ одноатомный

$i = 5$  – газ двухатомный

$i = 6$  – газ многоатомный

Для реального газа внутренняя энергия зависит от температуры и давления или от температуры и удельного объема, т.е.  $u = f(t, p)$ ,  $u = f(t, v)$ .

$$\text{Изменение внутренней энергии } \Delta u = u_2 - u_1 = \bar{c}_v (t_2 - t_1)$$

### Теплота

*Теплота* – количество энергии, передаваемое при непосредственном контакте тел, имеющих различную температуру, путем обмена кинетической энергии между молекулами, либо лучистым переносом энергии путем электрических волн.

Количество энергии, полученное телом в форме теплоты, называется *подведенной (сообщенной) теплотой* –  $Q_1$ ,  $q_1$ .

Количество энергии, отданное телом в форме теплоты, называется *отведенной (отнятой) теплотой* –  $Q_2$ ,  $q_2$ .

$$q \text{ (Дж/кг, кДж/кг)} – \text{удельное количество теплоты, } q = Q / m$$

$$Q, \text{ (Дж, кДж)} – \text{произвольное количество теплоты. } Q = m \cdot q$$

Подведенное (отведенное) количество теплоты

$$Q = \bar{c}m(t_2 - t_1)$$

Удельное количество теплоты, которое необходимо затратить в процессе нагревания 1 кг газа в интервале температур от  $t_1$  до  $t_2$ ,

$$q = \bar{c} (t_2 - t_1)$$

### Работа

*Работа* – количество энергии, которое идет на изменение объема тела.

Количество энергии, полученное телом в форме работы, называется *совершенной* над телом работой, а отданную энергию в форме работы – *затраченной* телом работой.

Затраченная телом работа является *положительной* и называется *работой расширения*, а совершенная над телом работа – *отрицательной* и называется *работой сжатия*.

Работа, связанная с изменением объема газа, в общем случае вычисляется по формуле

$$L = \int_{V_1}^{V_2} p dV,$$

### Первый закон термодинамики

*Первый закон термодинамики* является частным случаем закона сохранения и превращения энергии, впервые установленного основоположником русской науки М.В. Ломоносовым в замечательной по своей широте и значению формулировке закона *сохранения и неумничтожаемости материи, движения и силы*.

#### Закон сохранения и превращения энергии :

*«Энергия не исчезает и не возникает вновь, она лишь переходит из одного вида в другой в различных физических и химических процессах».*

Т.е. для любой изолированной системы (такой термодинамической системы, которая не обменивается с окружающей средой ни теплом, ни работой, ни веществом) количество энергии, заключённое в этой системе, сохраняется неизменным.

### Формулировка и уравнение первого закона термодинамики

*Первый закон термодинамики* устанавливает эквивалентность при взаимных превращениях механической и тепловой энергии.

В результате подвода теплоты к телу температура тела повышается, объем тела увеличивается и производится внешняя работа. При этом *«подведенная к телу теплота расходуется на увеличение внутренней энергии тела  $U$  и на совершение работы  $L$ »:*

$$Q_{1-2} = \Delta U_{1-2} + L_{1-2},$$

где  $Q_{1-2}$  – теплота, сообщенная телу при нагревании от состояния 1 до состояния 2;

$\Delta U_{1-2}$  – изменение внутренней энергии тела;  $\Delta U_{1-2} = U_2 - U_1$

$L_{1-2}$  – работа, совершаемая телом в процессе 1-2.

Аналитическое выражение первого закона термодинамики или основное уравнение теплоты в дифференциальной форме для любого тела

$$dQ = dU + dL,$$

где  $dQ$  — количество теплоты, сообщенное извне рабочему телу массой  $m$  кг;

$dU$  — изменение внутренней энергии рабочего тела;

$dL$  — работа, совершенная рабочим телом по преодолению внешнего давления, «внешняя работа» расширения.

Каждый из трех членов этого уравнения может быть в зависимости от характера изменения состояния положительным, или отрицательным, или равным нулю.

Теплота, подводимая к системе – положительная, отводимая от системы – отрицательная.

Работа, производимая системой – положительная (работа расширения  $L_{расш}$ ), работа, совершаемая над системой – отрицательная (работа сжатия  $L_{сж}$ ).

### Энтальпия газов

Как было выше сказано, аналитическое выражение первого закона термодинамики имеет вид:

$$\text{для любого тела } dQ = dU + dL,$$

где  $dQ$  – количество теплоты, сообщенное извне рабочему телу массой  $M$ , кг;

$dU$  – изменение внутренней энергии рабочего тела;

$dL$  – работа, совершенная рабочим телом по преодолению внешнего давления.

$$\text{для бесконечно малого изменения состояния 1 кг любого газа}$$

$$dq = du + dl,$$

Так как  $dl = pdv$ , то

$$dq = du + pdv,$$

где  $dl = pdv$  – работа расширения 1 кг газа.

Заменяя в основном уравнении термодинамики величину  $pdv$  через  $d(pv) - vdp$  получаем  $dq = du + d(pv) - vdp = d(u + pv) - vdp$ .

Выражение  $(u + pv)$  является параметром состояния и называется *энтальпией*  $h$ , кДж/кг.  $h = u + pv$ , (в некоторых учебниках энтальпию обозначают буквой  $i$ )

Основное уравнение первого закона термодинамики, выраженное через энтальпию имеет вид

$$dq = dh - vdp,$$

### Основные термодинамические процессы

1) *Изохорный процесс* – процесс сообщения или отнятия теплоты при постоянном объеме газа ( $V = \text{const}$ );

2) *Изобарный процесс* – процесс сообщения или отнятия теплоты при постоянном давлении ( $P = \text{const}$ );

3) *Изотермический процесс* – процесс сообщения или отнятия теплоты при постоянной температуре ( $t = \text{const}$ );

4) *Адиабатный процесс* – процесс, при котором отсутствует теплообмен с окружающей средой ( $dq = 0$ );

5) *Политропный процесс* – процесс, в котором изменение параметров подчиняется уравнению  $pv^n = \text{const}$ , где  $n$  – величина, постоянная для данного процесса.

### Метод исследования процессов состоит в следующем:

1. Выводится уравнение процесса, устанавливающее связь между начальными и конечными параметрами рабочего тела в данном процессе;

2. Вычисляется работа изменения объема газа;
3. Определяется количество теплоты, подведенной (или отведенной) к газу в процессе;
4. Определяется изменение внутренней энергии системы в процессе;
5. Определяется изменение энтропии системы в процессе.

## 1 Изохорный процесс ( $V=const$ )

Для графического метода исследования процессов используется координатная система  $p$ - $v$ .

Изохорный процесс в  $p$ - $v$ -диаграмме изображается отрезком прямой 1-2, идущим параллельно оси ординат. Прямая 1-2 называется *изохорой*.

При направлении от точки 1 к точке 2 процесс идёт с сообщением теплоты, при направлении от точки 2 к точке 1 – с отводом теплоты.

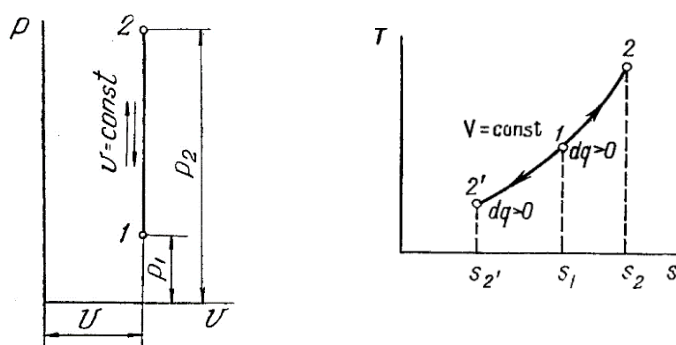


Рисунок 1 – Изохорный процесс в  $p$ - $v$ - и  $T$ - $s$ -диаграмме

Уравнение изохоры имеет вид  $v = const$ ,

Зависимость между начальными и конечными параметрами процесса выражается

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2},$$

Изменение внутренней энергии определяется

$$\Delta u_v = q_v = \bar{c}_v(t_2 - t_1),$$

Если в процессе участвует  $m$ , кг газа, то количество теплоты (изменение внутренней энергии газа) определяется

$$Q_v = \Delta U_v = m\bar{c}_v(t_2 - t_1),$$

В изохорном процессе из-за отсутствия расширения газа работа  $L=0$ , и подводимая к газу теплота полностью идёт на изменение его внутренней энергии.

$$\text{Изменение энтропии в изохорном процессе } (s_2 - s_1)_v = \bar{c}_v \ln \frac{T_2}{T_1}$$

## 2 Изобарный процесс ( $P=const$ )

Изобарный процесс в  $p$ - $v$ -диаграмме изображается отрезком прямой 1-2, идущим параллельно оси абсцисс. Прямая 1-2 называется *изобарой*.

При направлении от точки 1 к точке 2 процесс идёт с сообщением теплоты. Работа в этом случае имеет положительное значение. При направлении от точки 2 к точке 1 – с отводом теплоты, и работа имеет отрицательное значение.



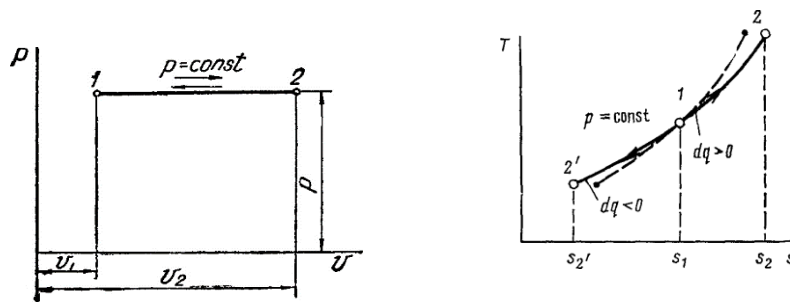


Рисунок 2 – Изобарный процесс в  $p$ - $v$ - и  $T$ - $S$ -диаграмме

Уравнение изобары имеет вид  $p = \text{const}$ ,

Зависимость между начальными и конечными параметрами процесса выражается

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2},$$

Работа 1 кг газа определяется по формуле

$$l = p(v_2 - v_1),$$

$$\text{или } l = R_0(T_2 - T_1),$$

Для  $m$ , кг газа работа определяется

$$L = mp(v_2 - v_1) = p(V_2 - V_1),$$

$$\text{или } L = mR_0(t_2 - t_1),$$

Изменение внутренней энергии определяется

$$\Delta u_p = q_p = c_{pm}(t_2 - t_1),$$

Количество теплоты определяется

$$Q_p = m\bar{c}_p(t_2 - t_1),$$

Изменение энтропии в изобарном процессе

$$(s_2 - s_1)_T = R_0 \ln \frac{v_2}{v_1} = R_0 \ln \frac{p_1}{p_2}$$

### 3. Изотермический процесс ( $t = \text{const}$ )

Изотермический процесс в  $p$ - $v$ -диаграмме изображается равнобокой гиперболой 1-2, для которой координатные оси служат асимптотами. Гипербола 1-2 называется *изотермой*.

При направлении от точки 1 к точке 2 процесс идёт с сообщением теплоты. Работа в этом случае имеет положительное значение. При направлении от точки 2 к точке 1 – с отводом теплоты, и работа имеет отрицательное значение.

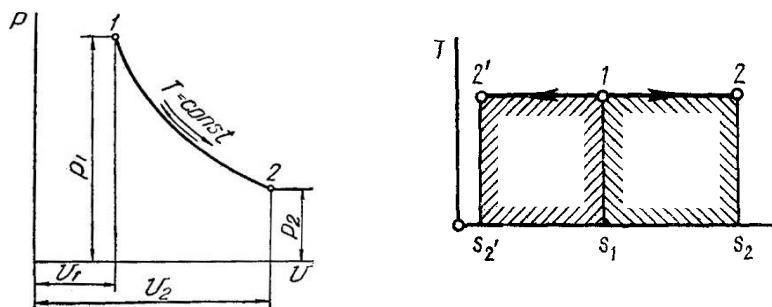


Рисунок 3 – Изотермический процесс в  $p$ - $v$ - и  $T$ - $S$ -диаграмме

Уравнение изотермы имеет вид  $pv = \text{const}$ ,

Зависимость между начальными и конечными параметрами процесса выражается

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1},$$

Работа 1 кг идеального газа определяется уравнениями

$$l = R T \ln \frac{v_2}{v_1},$$

$$l = R_0 T \ln \frac{p_1}{p_2},$$

$$l = p v RT \ln \frac{v_2}{v_1},$$

$$l = p_1 v_1 RT \ln \frac{p_1}{p_2},$$

Так как в изотермическом процессе  $t = \text{const}$ , то изменение внутренней энергии определяется  $\Delta u_p = \bar{c}_v (t_2 - t_1) = 0$ ,

Количество теплоты, сообщаемой газу или отнимаемой от него, определяется

$$q_t = l,$$

для  $m$ , кг газа  $Q_t = L$ ,

#### 4 Адиабатный процесс ( $dq=0$ )

Основным условием адиабатного процесса является полное отсутствие теплообмена между средой и рабочим телом (газом). Адиабатный процесс в  $pv$ -диаграмме изображается неравнобокой гиперболой 1-2, не пересекающую координатных осей. Гипербола называется *адиабатой*. Адиабата располагается круче изотермы.

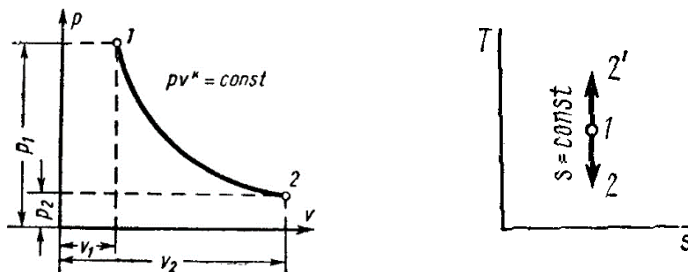


Рисунок 4 – Адиабатный процесс в  $pv$ - и  $TS$ -диаграмме

Уравнение адиабаты имеет вид  $pv^k = \text{const}$ , где  $k = \frac{c_p}{c_v}$  - показатель адиабаты.

Зависимость между начальными и конечными параметрами процесса:

между  $p$  и  $v$   $\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k,$

между  $T$  и  $v$   $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1},$

между  $p$  и  $T$   $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}},$

Работа 1 кг газа определяется по следующим формулам

$$l = \frac{1}{k-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2),$$

$$l = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \right],$$

$$l = \frac{R_0}{k-1} (T_1 - T_2),$$

$$l = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right],$$

Уравнение первого закона термодинамики для адиабатного процесса имеет вид

$$\Delta u = -l,$$

$$\Delta u = \bar{c}_v (t_2 - t_1),$$

Изменение внутренней энергии газа и работа адиабатного процесса равны по величине и противоположны по знаку.

*Изменение энтропии в адиабатном процессе*

$$s_2 - s_1 = 0, \quad s = \text{const}$$

## 5 Политропный процесс ( $p v^n = \text{const}$ )

Политропным процессом описывается любой закономерный процесс или совокупность отдельных закономерных процессов.

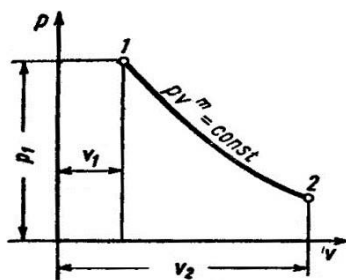


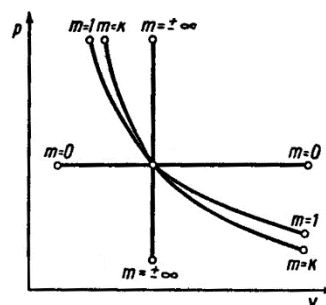
Рисунок 5 – Политропный процесс в  $p v$ - диаграмме

Уравнение политропы при постоянной теплоёмкости имеет вид

$$p v^n = \text{const},$$

где  $n$  - показатель политропы.

По величине показателя политропы  $n$  можно определить её относительное расположение в  $p v$ -диграмме и выяснить характер процесса, т.е. есть ли подвод или отвод теплоты, увеличение или уменьшение внутренней энергии газа.



Для процессов расширения:

- 1)  $n > 1$  – теплота подводится ( $q > 0$ ), внутренняя энергия газа увеличивается ( $\Delta u > 0$ );

2)  $\kappa > n > 1$  – теплота подводится ( $q > 0$ ), внутренняя энергия газа уменьшается ( $\Delta u < 0$ );

3)  $n > \kappa$  – теплота отводится ( $q < 0$ ), внутренняя энергия газа уменьшается ( $\Delta u < 0$ ).

Для процессов сжатия:

1)  $n < 1$  – теплота отводится, внутренняя энергия газа уменьшается;

2)  $\kappa > n > 1$  – теплота отводится, внутренняя энергия газа увеличивается;

3)  $n > \kappa$  – теплота подводится, внутренняя энергия газа увеличивается.

Зависимость между начальными и конечными параметрами процесса:

между  $p$  и  $v$  
$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n,$$

между  $T$  и  $v$  
$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1},$$

между  $p$  и  $T$  
$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}},$$

Работа 1 кг газа определяется по следующим формулам

$$l = \frac{1}{n-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2),$$

$$l = \frac{p_1 v_1}{n-1} \left[ 1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1} \right],$$

$$l = \frac{R_0}{n-1} (T_1 - T_2),$$

$$l = \frac{p_1 v_1}{n-1} \left[ 1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \right],$$

Если количество теплоты, участвующей в процессе, известно, то работа может быть

определена 
$$l = \frac{k-1}{k-n} q,$$

Количество теплоты, сообщаемой газу или отнимаемой от него, определяется

$$q = \epsilon (t_2 - t_1) = \epsilon_v \frac{n-k}{n-1} (t_2 - t_1),$$

Изменение внутренней энергии газа определяется

$$\Delta u_p = \bar{c}_v (t_2 - t_1),$$

$$\Delta u = \frac{n-1}{1-k} l,$$

Показатель политропного процесса определяется 
$$m = \frac{c_p - c}{c_v - c},$$

Изменение энтропии в политропном процессе

$$s_2 - s_1 = c \ln T_2 / T_1, \quad \text{где } c = c_v [(n-k) / (n-1)]$$

## Второй закон термодинамики

Первым законом термодинамики устанавливается:

1. эквивалентность взаимных превращений тепла и работы и, следовательно, количественные отношения между теплом и работой при этих превращениях;
2. постоянство энергии изолированной термодинамической системы;

3. взаимная связь между теплом, внутренней энергии системы и работой изменения объёма, совершаемой ею или совершаемой над ней окружающей средой.

*Первый закон термодинамики* характеризует процессы превращения энергии с количественной стороны.

*Второй закон термодинамики* характеризует качественную сторону этих процессов.

*Первый закон ТД утверждает*, что в природе теплота и работа эквивалентны и взаимопревращаемы. Но из первого закона ТД не указаны условия, при которых эти превращения теплоты и работы возможны, так как не все процессы в природе осуществимы. Например, I закон ТД не определяет направление переноса теплоты и не отвечает на вопрос- вся ли теплота переходит в работу или только какая – то ее часть и т.д.

Из опыта следует, что теплота переходит самопроизвольно только от более нагретого тела к менее нагретому, и работу можно превращать в теплоту, но не наоборот. Поэтому, между преобразованием теплоты в работу и наоборот, работы в теплоту существует различие.

*Второй закон термодинамики указывает направление передачи теплоты, а также ее долю, которую возможно перевести в работу.*

В 1850 году Р. Клаузиус дал следующую формулировку II закона ТД: *«Теплота не может переходить от холодного тела к более нагретому сама собой».*

В 1851 году У. Томсон дал другую формулировку II закона ТД: *«Не вся теплота, полученная от теплоотдатчика, может перейти в работу, а только некоторая её часть. Другая её часть неизбежно должна перейти в теплоприёмник».*

В 1892 году В. Оствальд сформулировал II закон ТД так: *«Осуществление вечного двигателя второго рода невозможно».*

Если обобщить все формулировки, то получим следующую формулировку II закона ТД: *«Любой реальный процесс является необратимым».*

Следовательно, для существования теплового двигателя необходимо наличие теплоотдатчика (горячего источника), рабочего тела и теплоприемника (холодного источника).

*Второй закон термодинамики определяет:*

- направление, в котором протекают процессы;
- устанавливает условия преобразования тепловой энергии в механическую;
- определяет максимальное значение работы, которая может быть произведена тепловым двигателем.

*Математически II закон ТД записывается в виде:* 
$$dS \geq \frac{dQ}{T},$$

где  $dS$  - бесконечно малое приращение энтропии системы;

$dQ$  - бесконечно малое количество теплоты, полученной системой от источника теплоты;

$T$  - абсолютная температура источника теплоты.

Знак «>» соответствует необратимым процессам.

Знак «=» соответствует обратимым процессам.

*Аналитически II закон ТД имеет вид:*  $dQ = TdS$  или  $TdS = dU + pdv$

## Энтропия идеального газа

Энтропия обозначается буквой  $S$ ,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ .

Основное уравнение для определения изменения энтропии

$$dS = \frac{dq}{T}$$

Энтропия характеризует наличие теплообмена между рабочим телом и окружающей средой. Если она изменяется, то есть теплообмен между рабочим телом и окружающей средой.

В расчетах используют не абсолютное значение энтропии, а изменение энтропии:

$$\Delta S = S_2 - S_1.$$

Энтропия определяется любой парой ТД параметров состояния:

$$s = s_1(p, v), s = s_2(p, T), s = s_3(v, T)$$

По характеру изменения энтропии в равновесном процессе можно судить о том, в каком направлении происходит теплообмен.

Если тело нагревается ( $\Delta q > 0$ ), то его энтропия возрастает ( $ds > 0$ ).

Если тело охлаждается ( $\Delta q < 0$ ), то его энтропия убывает ( $ds < 0$ ).

Если тепло не подводится к телу ( $\Delta q = 0$ ), то его энтропия постоянна ( $ds = 0$ ).

**Принцип существования энтропии** формулируется как математическое выражение энтропии термодинамических систем в условиях обратимого течения процессов:

$$dS_{\text{обр}} = \frac{\delta Q^*_{\text{обр}}}{T}.$$

**Принцип возрастания энтропии** сводится к утверждению, что энтропия изолированных систем неизменно возрастает при всяком изменении их состояния и остается постоянной лишь при обратимом течении процессов:

$$dS_{\text{изол}} \geq 0.$$

## Тепловая диаграмма (TS-диаграмма)

В инженерной практике используется графическая зависимость  $T(s)$ , которая позволяет в  $T, s$  – координатах изображать количество подведенной к системе (или отведенной) теплоты в обратимом процессе в виде площади под кривой процесса, т.е.

$$q = \int_1^2 T ds, \text{ площадь } 1-2-s_2-s_1$$

В TS-диаграмме состояние тела изображается точкой «•», а всякий обратимый процесс – непрерывной линией.

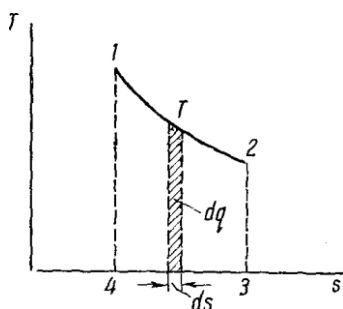


Рисунок 1 – Тепловая диаграмма

Так как *энтропия – есть функция состояния* произвольной термодинамической системы, то каждое её состояние отображается точкой на плоскости Т, s.

## ВОДЯНОЙ ПАР. ПРОЦЕССЫ ВОДЯНОГО ПАРА.

### Уравнение состояния реального газа

*Реальный газ* – это газ, который обладает большой плотностью.

*Уравнение состояния реальных газов (уравнение Ван- дер- Ваальса)* имеет вид:

$$\left(P + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT,$$

где  $\frac{a}{v^2}$  - поправка на внутреннее давление;

b - поправка на внутренний объём занимаемый молекулами (a и b – константы, характеризующие индивидуальные свойства вещества).

Уравнение Ван – дер - Ваальса учитывает реальные свойства газа – наличие межмолекулярного воздействия в газах и собственный объём молекул.

### Водяной пар

*Пар* – это реальный газ в состоянии, близком к жидкой фазе (насыщению).

Водяной пар широко используется в качестве рабочего тела в теплоэнергетических и в промышленных установках. Он производится в котельных агрегатах при заданном постоянном давлении. На рисунке 1 дана рv-диаграмма для водяного пара.

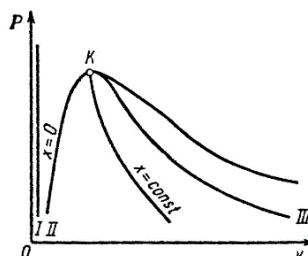


Рисунок 1 – pV-диаграмма для водяного пара

**Кривая I** - вода при 0°C;

**Кривая II** - вода при температуре кипения (или температуре насыщения) – нижняя пограничная кривая;

**Кривая III** – сухой насыщенный пар – верхняя пограничная кривая.

**Точка К** – это критическая точка, разделяющая обе пограничные кривые.

Кривые I, II, III делят всю диаграмму на три части:

- 1) область между I и II – жидкость;
- 2) область между II и III – смесь кипящей жидкости и пара, т.е. влажный насыщенный пар;
- 3) область правее III – перегретый пар.

Критическая точка К характеризует критическое состояние, при котором исчезает различие в свойствах пара и жидкости. Критическая температура является наивысшей

температурой жидкости и её насыщенного пара. При температурах выше критической возможно существование только перегретого пара.

Критические параметры водяного пара:  $t_{кр}=374,15^{\circ}\text{C}$ ;  $p_{кр}=22,129\text{МПа}$ ;  $v_{кр}=0,00326\text{м}^3/\text{кг}$ .

### Сухой насыщенный пар

Состояние сухого насыщенного пара определяется его давлением или температурой. По таблицам насыщенного водяного пара (по температурам) можно найти давление пара (и все его остальные параметры) по температуре, а по таблицам насыщенного водяного пара (по давлениям) – температуру пара (и все остальные его параметры) по давлению.

Энтальпия  $h''$  сухого насыщенного пара определяется по формуле

$$h'' = h' + r$$

Изменение внутренней энергии при получении сухого насыщенного пара из 1 кг жидкости при  $0^{\circ}\text{C}$  – по выражению

$$u'' = h'' - pv''$$

### Влажный насыщенный пар

Состояние влажного насыщенного пара определяется его давлением или температурой и степенью сухости (паросодержанием)  $x$ . Значение  $x=0$  соответствует воде в состоянии кипения, а  $x=1$  – сухому насыщенному пару.

Температура влажного пара – это функция только давления и определяется так же, как и температура сухого пара по таблицам насыщенного водяного пара (по давлениям).

Удельный объём влажного пара для больших и малых давлений определяется по уравнению

$$v_x = v'' + (1-x)v'$$

Для давлений до 3 МПа и  $x \geq 0,8$  удельный объём влажного насыщенного пара определяется по формуле

$$v_x = v''x$$

Степень сухости определяется по формуле

$$x = \frac{v - v'}{v'' - v'}$$

Плотность влажного пара определяется по формуле

$$\rho_x = \frac{1}{v_x} = \frac{1}{v''x + (1-x)v'}$$

или приближённо

$$\rho_x = \frac{1}{v''x} = \frac{\rho''}{x}$$

Энтальпия  $h''$  влажного насыщенного пара определяется по формуле

$$h_x = h' + rx$$

Изменение внутренней энергии

$$u_x = h_x - pv_x, \quad (10)$$

где  $i_x$  – энтальпия влажного насыщенного пара;

$u_x$  – внутренняя энергия влажного насыщенного пара.



### Перегретый пар

Перегретый пар имеет более высокую температуру  $t$  по сравнению с температурой  $t_n$  сухого насыщенного пара того же давления. Следовательно, перегретый пар определённого давления может иметь различные температуры.

Для характеристики перегретого пара необходимо знать *два его параметра*, например давление и температуру.

Разность температур перегретого и насыщенного пара того же давления  $t - t_n$  называют *перегревом пара*.

Важным является определение количества теплоты, затрачиваемой на отдельные стадии процесса парообразования и изменения внутренней энергии.

*Теплота жидкости* – это количество теплоты, затраченной для подогрева жидкости от  $0^\circ\text{C}$  до температуры кипения при постоянном давлении. Её можно определить как разность энтальпий жидкости в состоянии кипения и жидкости при том же давлении и  $0^\circ\text{C}$

$$q_p = h_2 - h_1 = h' - h_0'' \quad (11)$$

Так как  $h_0''$  при невысоких давлениях можно считать равным нулю, то

$$q_p = h'$$

*Внутренняя энергия жидкости равна энтальпии жидкости*

$$u' = h', \quad (13)$$

где значения  $h'$ , а следовательно и  $u'$  приводятся в таблицах насыщенного пара.

*Теплота парообразования* ( $r$ ) – это количество теплоты, необходимое для перевода 1 кг кипящей жидкости в сухой насыщенный пар при постоянном давлении. Это количество теплоты расходуется на изменение внутренней энергии, связанное с преодолением сил сцепления ( $d$ ) между молекулами жидкости, и на работу расширения ( $\psi$ ).

*Теплота перегрева* – количество теплоты, необходимое для перевода 1 кг сухого насыщенного пара в перегретый при постоянном давлении.

Значения энтальпии перегретого пара приводятся в таблицах воды и перегретого водяного пара.

### Энтропия пара

Энтропия водяного пара отсчитывается от условного нуля, в качестве которого принимают энтропия воды при  $0,01^\circ\text{C}$  и при давлении насыщения, соответствующем этой температуре  $0,0006108\text{МПа}$ .

*Энтропия жидкости* определяется по формуле

$$s' = 4,19 \ln \frac{T_n}{273},$$

где 4,19 – теплоёмкость воды,  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ;

$T_n$  – температура насыщения,  $\text{K}$ .

Если жидкость подогревается не до температуры кипения, а до произвольной температуры  $T$ , то под  $T_n$  в формуле (16) следует понимать эту произвольную температуру.

*Энтропия сухого насыщенного пара  $s''$*  определяется

$$s'' = s' + \frac{r}{T_n},$$

где  $r$  – теплота парообразования.

Энтропия влажного насыщенного пара определяется

$$s_x = s' + \frac{r}{T_n} x$$

$$s_x = s' + (s'' - s')x,$$

где  $x$  – степень сухости пара.

Энтропии  $s'$  и  $s''$  приводятся в таблицах насыщенного пара, а  $\frac{r}{T_n}$  можно получить из этих же таблиц как разность  $s'' - s'$ .

### hs-диаграмма для водяного пара

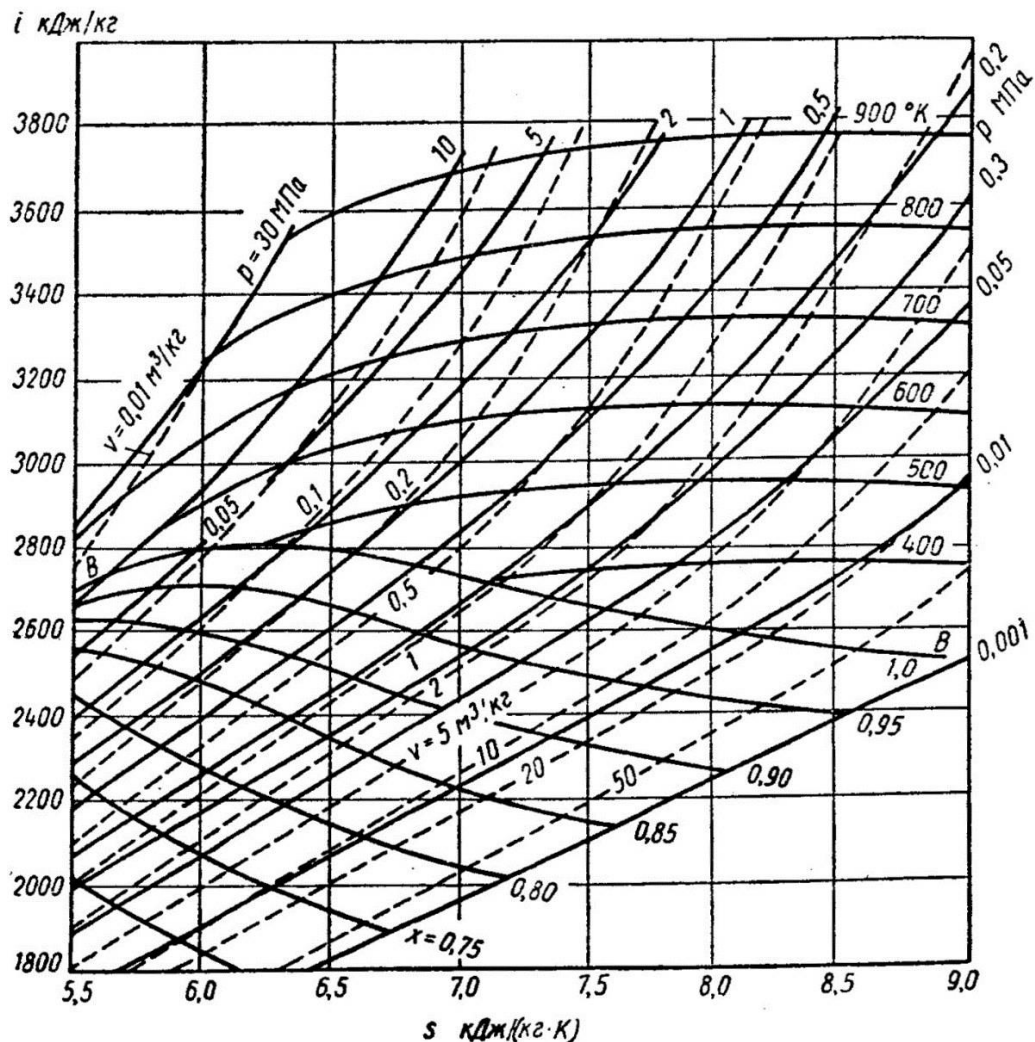


Рисунок 3 - hs-диаграмма для водяного пара

На ней нанесены изохоры (пунктирные кривые), изобары, изотермы и линии равной сухости пара. Линия ВВ – верхняя пограничная кривая. Ниже её расположена область влажного насыщенного пара, выше её – область перегретого пара. Изобары в области насыщенного пара – прямые линии, являющиеся одновременно изотермами. При переходе

в область перегретого пара изобары и изотермы разделяются, и каждая из них представляет собой отдельную кривую. *is*-диаграмма позволяет быстро определить параметры пара с достаточной точностью, даёт возможность определять энтальпию водяного пара и разности энтальпий в виде отрезков, наглядно изображает адиабатный процесс, имеющий большое значение при изучении паровых двигателей.

### Термодинамические процессы пара

**Рассмотрим основные термодинамические процессы водяного пара в координатах.**

В изобарном процессе  $1—2$  начальное состояние пара характеризуется точкой 1 (пересечение изобары  $p$  с кривой заданной степени сухости  $x$ ), конечное состояние — точкой 2 (пересечение изобары с изотермой  $t_2$ ). Зная начальное и конечное состояние пара в точках 1 и 2, можно определить  $h_1, h_2, v_1, v_2, s_1, s_2$ .

Изменение внутренней энергии в процессе  $1—2$

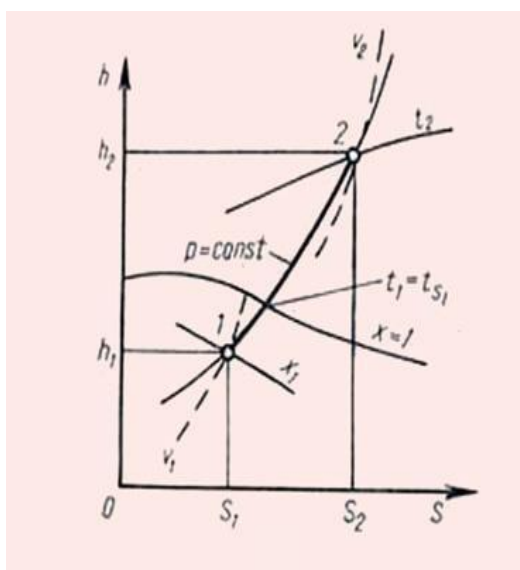
$$\Delta u = (h_2 - h_1) - p(v_2 - v_1).$$

Количество подведенного к процессу тепла

$$q = h_2 - h_1.$$

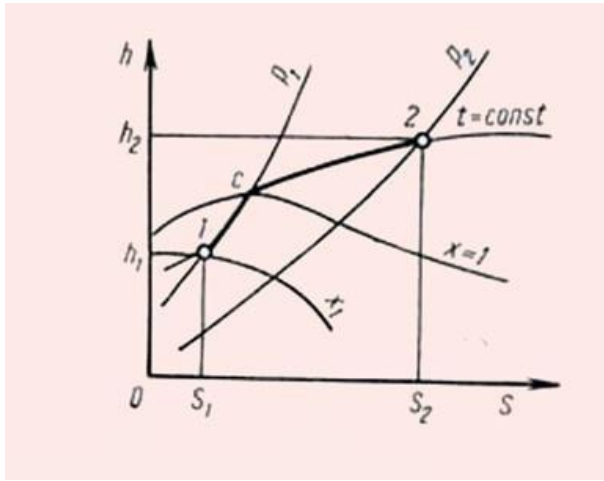
Работа расширения

$$l_{1-2} = p(v_2 - v_1).$$



### Изображение изобарного процесса

В изотермическом процессе  $1—2$  начальное и конечное состояния пара определяются точкой 1 (пересечение изобары  $p_1$  с кривой степени сухости  $x_1$  и точкой 2 (пересечение изотермы  $t$  с изобарой  $p_2$ ). Изменение внутренней энергии, подведенное или отведенное тепло и внешняя работа могут быть определены по формулам



**Изображение изотермического процесса**

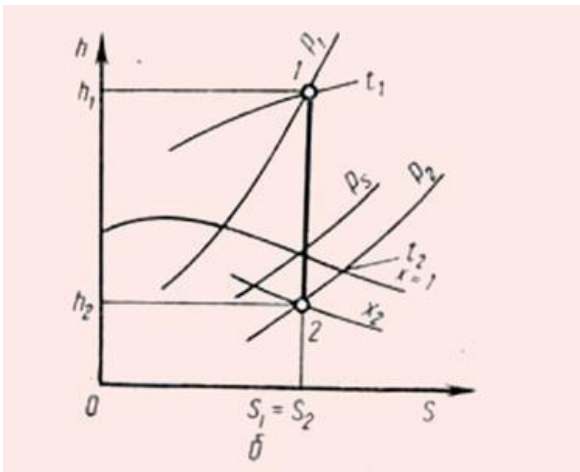
$$u_{1-2} = (h_2 - h_1) - (p_2 v_2 - p_1 v_1);$$

$$q_{1-2} = T(s_2 - s_1);$$

$$l_{1-2} = q_{1-2} - \Delta u_{1-2}$$

В адиабатном процессе 1—2 внешняя работа

$$l_{1-2} = -u_{1-2} = (h_1 - h_2) - (p_1 s_1 - p_2 s_2)$$

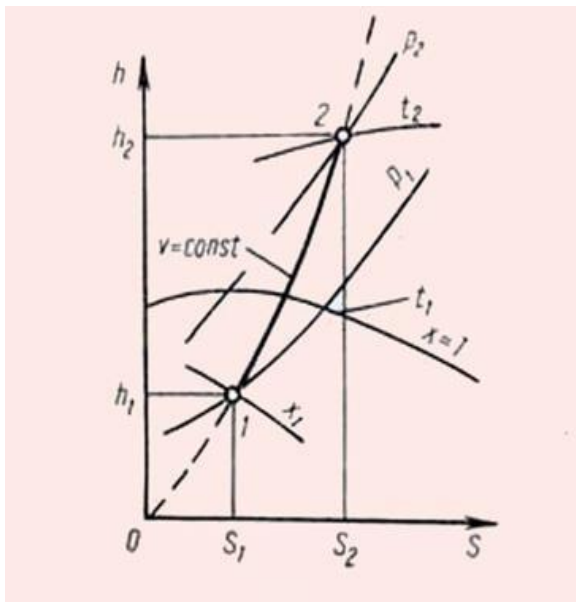


**Изображение адиабатного процесса**

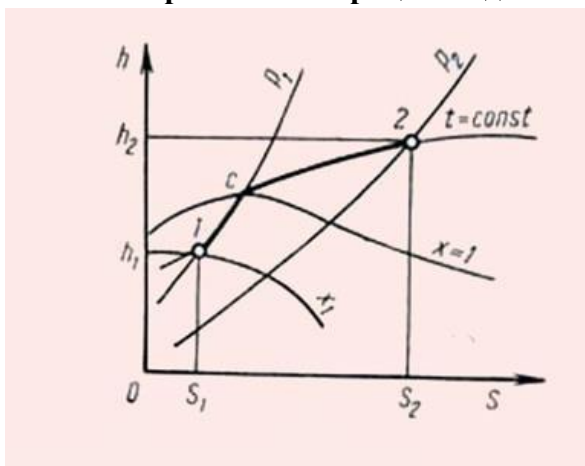
Процесс 1—2 изображается прямой, перпендикулярной оси S, поскольку процесс идет при постоянной энтропии  $S_1 = S_2$ . Начальное (точка 1) и конечное (точка 2) состояния водяного пара определяются пересечением изотермы  $t_1$  с изобарой  $p_1$  (точка 1) и прямой процесса 1—2 с изобарой  $p_2$  или изобары  $p_2$  и кривой степени сухости  $x$  (точка 2).

Диаграмма  $h, S$  широко используется для определения параметров пара при выполнении теплотехнических расчетов паросиловых установок, паровых сушилок, теплообменных аппаратов и т. п.

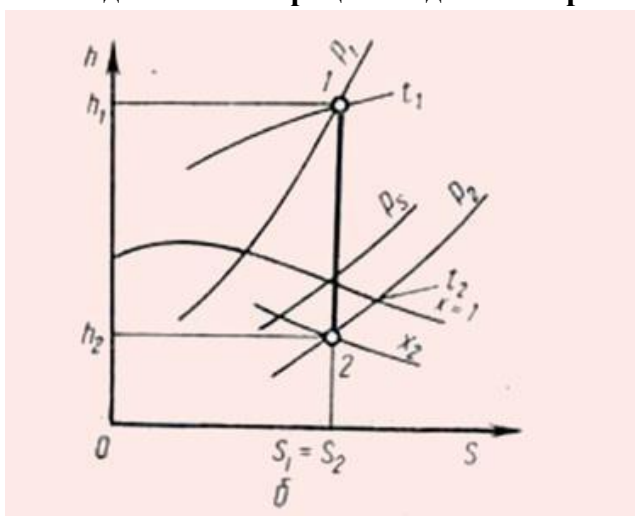
### Изохорный процесс водяного пара



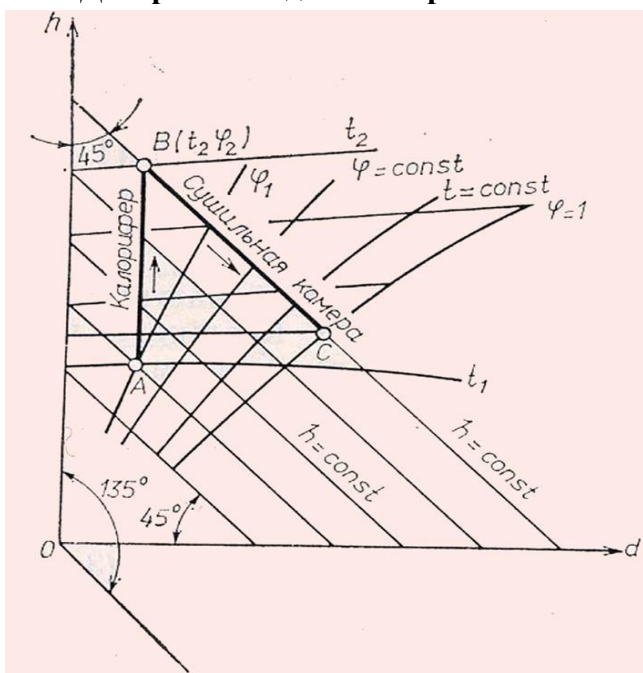
### Изотермический процесс водяного пара



### Адиабатный процесс водяного пара



## Диаграмма водяного пара Л. К. Рамзина



## Круговые процессы. Цикл Карно

Круговой процесс (цикл) – совокупность термодинамических процессов, в результате осуществления которых рабочее тело возвращается в исходное состояние.

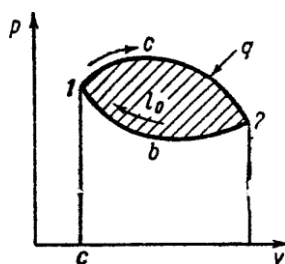


Рисунок 9.1 – Круговой процесс в PV-диаграмме

$l_0$  – работа кругового процесса. В  $p-v$ -диаграмме изображается площадью внутри замкнутого контура цикла.

$l_0 > 0$  – цикл совершается по часовой стрелке – прямой цикл, который характерен для тепловых двигателей.

$l_0 < 0$  – цикл совершается против часовой стрелки – обратный цикл, который характерен для холодильных машин.

$$l_0 = q_1 - q_2,$$

где  $q_1$  – количество теплоты, которую берёт 1 кг рабочего тела от внешнего (верхнего) источника теплоты.

$q_2$  – количество теплоты, которую отдаёт 1 кг рабочего тела внешнему охладителю (нижнему источнику).

Количество теплоты в TS-диаграмме изображается площадью. Заключённой внутри замкнутого контура цикла. Эта площадь представляет собой величину работы за 1 цикл.

$l_0 > 0$  – цикл совершается по часовой стрелке – прямой цикл.

$l_0 < 0$  – цикл совершается против часовой стрелки – обратный цикл.

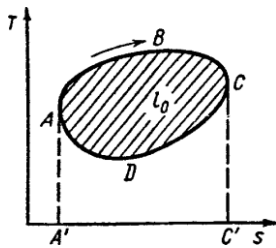


Рисунок 9.2 – Круговой процесс в TS-диаграмме

Термический к.п.д. в круговых процессах определяется по формуле

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{l_0}{q_1}.$$

По TS-диаграмме термический к.п.д. можно определить графическим путём

$$\eta_t = \frac{\text{площадь } ABCD}{\text{площадь } ABCC' A'}$$

### Цикл Карно. Теорема Карно

В 1824 г. франц. инженер Сади Карно рассмотрел цикл теплового двигателя.

Тепловой двигатель – непрерывно действующая система, осуществляющая круговые процессы (циклы), в которых теплота превращается в работу.

Цикл Карно осуществляется рабочим телом между двумя источниками теплоты – горячим и холодным.

Цикл Карно состоит из двух адиабат и двух изотерм.

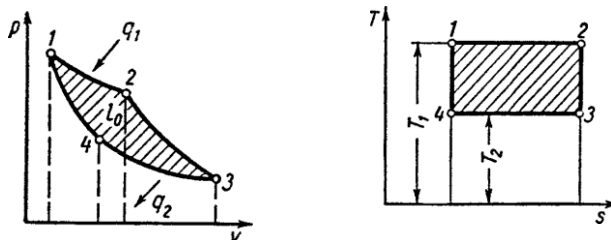


Рисунок 9.3 – Цикл Карно в PV-диаграмме и TS-диаграмме

Подвод теплоты  $q_1$  в прямом цикле Карно осуществляется при расширении газа по изотерме 1-2 ( $T_1 = \text{const}$ ). Отвод теплоты  $q_2$  к холодному источнику происходит при сжатии газа по изотерме 3-4 ( $T_2 = \text{const}$ ). Процесс 2-3 – адиабатное расширение газа (подвод теплоты прекращается и расширение происходит по адиабате. При этом температура газа уменьшается, и работа  $l_0$  производится за счет внутренней энергии газа. Процесс 4-1 – адиабатное сжатие газа (без тепла).

От точки 1 к точке 2 – теплота подводится, от точки 3 к точке 4 – теплота отводится.

Количество подведённой теплоты определяется по формуле

$$q_1 = RT_1 \ln \frac{v_2}{v_1}$$

Количество отведённой теплоты определяется по формуле

$$q_2 = RT_2 \ln \frac{v_3}{v_4}$$

Работа цикла Карно определяется по формуле

$$l_0 = q_1 - q_2$$

Термический к.п.д. цикла Карно определяется по формуле

$$\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – температуры верхнего и нижнего источников теплоты, К.

Чем выше температура горячего источника тепла, тем ниже температура холодного источника, тем термический к.п.д. цикла Карно больше.

**Теорема Карно:** КПД цикла Карно не зависит от природы рабочего тела, а зависит только от абсолютных температур горячего и холодного источников теплоты.

### Истечение газов и паров. Дросселирование

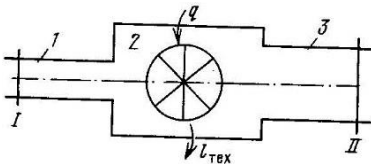
Под открытыми термодинамическими системами понимаются термодинамические системы, которые кроме обмена теплотой и работой с окружающей средой допускают обмен массой. В технике широко используются процессы преобразования энергии в потоке, когда рабочее тело перемещается из области с одними параметрами ( $p_1, v_1$ ) в область с другими параметрами ( $p_2, v_2$ ). Это, например, расширение пара в турбинах, сжатие газа в компрессорах.

Рассмотрим одномерные стационарные потоки, в которых параметры зависят только от одной координаты, совпадающей с направлением вектора скорости, и не зависящей от времени. Условие неразрывности течения в таких потоках заключается в одинаковости массового расхода  $m$  рабочего тела в любом его сечении.

$$m = \rho c F = \text{const}$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения канала,  $c$  – скорость рабочего тела.

Рассмотрим открытую термодинамическую систему, представленную на рисунке



По трубопроводу 1 рабочее тело с параметрами  $T_1, v_1, p_1$  подаётся со скоростью  $c_1$  в тепломеханический агрегат 2 (двигатель, паровой котёл, компрессор и т.д.) Здесь каждый килограмм рабочего тела в общем случае может получить от внешнего источника теплоту  $q$  и совершить техническую работу  $l_{\text{тех}}$  например, приводя в движение ротор турбины, а затем удаляется через выпускной патрубок 3 со скоростью  $c_2$ , имея уже параметры  $T_2, v_2, p_2$ .

Если в потоке мысленно выделить замкнутый объём рабочего тела и наблюдать за изменением его параметров в процессе перемещения, то для описания его поведения будут пригодны все полученные ранее термодинамические соотношения, в том числе первый закон термодинамики, который можно записать в обычной его форме

$$q = \Delta u + l$$

Внутренняя энергия есть функция состояния рабочего тела, поэтому значение  $u_1$  определяется параметрами рабочего тела при входе (сечение потока 1), а значение  $u_2$  – параметрами рабочего тела при выходе из агрегата (сечение 2).

Работа расширения совершается рабочим телом на поверхностях, ограничивающих выделенный движущийся объём, т.е. на стенках агрегата и границах выделяющих этот объём в потоке. Часть стенок агрегата неподвижна, и работа расширения на них равна нулю.



Другая часть стенок специально делается подвижной (рабочие лопатки в турбине и компрессоре, поршень в поршневой машине), и рабочее тело совершает на них техническую работу  $l_{\text{тех}}$ .

При входе рабочее тело вталкивается в агрегат. Для этого необходимо преодолеть давление  $p_1$ . Поскольку  $p_1 = \text{const}$ , то каждый килограмм рабочего тела может занять объём  $v_1$  лишь при затрате работы, равной  $l_{\text{вталк}} = -v_1 p_1$

Для того, чтобы выйти в трубопровод 3, рабочее тело должно вытолкнуть из него такое же количество рабочего тела, ранее находившегося в нём, преодолев давление  $p_2$  т.е., каждый килограмм занимая объём  $v_2$ , должен произвести определённую работу выталкивания  $l_{\text{выталк}} = v_2 p_2$

Сумма  $l_{\text{в}} = p_2 v_2 - p_1 v_1$  называется **работой вытеснения**. Если скорость  $c_2$  на выходе больше скорости  $c_1$  на входе 6, то часть работы расширения будет затрачена на увеличение кинетической энергии рабочего тела в потоке, равное  $c_2^2/2 - c_1^2/2$

Наконец, в неравновесном процессе, некоторая работа  $l_{\text{тр}}$  может быть затрачена на преодоление сил трения. И окончательно работа определится выражением

$$l = l_{\text{тех}} + (p_2 v_2 - p_1 v_1) + (c_2^2/2 - c_1^2/2) + l_{\text{тр}}$$

Теплота, сообщаемая каждому килограмму рабочего тела во время прохождения его через агрегат, складывается из теплоты внешней  $q_{\text{внеш}}$ , подведённой снаружи и теплоты  $q_{\text{тр}}$ , в которую переходит работа трения внутри агрегата т.е.

$$q = q_{\text{внеш}} + q_{\text{тр}}$$

Подставив полученные значения работы и теплоты в уравнение первого закона термодинамики, получим

$$q_{\text{внеш}} + q_{\text{тр}} = u_2 - u_1 + l_{\text{тех}} + (p_2 v_2 - p_1 v_1) + (c_2^2/2 - c_1^2/2) + l_{\text{тр}}$$

Поскольку теплота трения равна работе трения ( $q_{\text{тр}} = l_{\text{тр}}$ ), а  $u + pv = h$ , окончательно можно записать

$$q_{\text{внеш}} = h_2 - h_1 + l_{\text{тех}} + (c_2^2 - c_1^2)/2$$

Данное выражение является уравнением первого закона термодинамики для потока, которое можно сформулировать так – **теплота, подведённая к рабочему телу извне, расходуется на увеличение энтальпии рабочего тела, производство технической работы и увеличение кинетической энергии потока.**

Настоящее уравнение справедливо как для равновесных процессов, так и для течений, сопровождающихся трением.

Применим выведенный первый закон термодинамики для потока к различным типам тепломеханического оборудования

**Теплообменные аппараты** (устройство, в котором теплота от одной жидкой или газообразной среды передаётся другой среде). Для него  $l_{\text{тех}} = 0$ , а  $(c_2^2 - c_1^2) < q_{\text{внеш}}$ , поэтому

$$q_{\text{внеш}} = h_2 - h_1$$

**Тепловой двигатель**

$(c_2^2 - c_1^2) < l_{\text{тех}}$ ,  $q_{\text{внеш}} = 0$ , поэтому рабочее тело производит техническую работу за счёт уменьшения энтальпии.

$$l_{\text{тех}} = h_1 - h_2$$

$h_1 - h_2$  – располагаемый теплоперепад

**Компрессор.** Если процесс сжатия газа происходит без теплообмена с окружающей средой (это обеспечивается надлежащим выбором сечений всасывающего и нагнетательного воздухопроводов), то

$$l_{\text{tex}} = h_1 - h_2$$

В отличие от теплового двигателя здесь  $h_1 > h_2$ , т.е. техническая работа в адиабатном компрессоре затрачивается на увеличение энтальпии газа.

**Сопла и диффузоры** Специально спрофилированные каналы для разгона рабочей среды и придания потоку определённого направления называются **соплами**. Каналы, предназначенные для торможения потока и повышения давления, называются **диффузорами**. Техническая работа в них не совершается, поэтому

$$\delta q_{\text{внеш}} = dh + \delta q_{\text{внеш}} = dh + d(c^2/2)$$

Однако, если рабочее тело движется в потоке без трения, то первый закон термодинамики для закрытой системы

$$\delta q_{\text{внеш}} = dh - v dp$$

Приравняв правые части двух последних уравнений получим

$$c dc = -v dp$$

Из этого уравнения видно, что  $dc$  и  $dp$  всегда имеют противоположные знаки. Следовательно, увеличение скорости течения в потоке возможно лишь при уменьшении в нём давления. Наоборот, торможение потока сопровождается увеличением давления.

Так как длина сопла и диффузора невелика, а скорость течения среды в них достаточно высока, то теплообмен в них между стенками канала и средой при малом времени их контакта настолько незначителен, что в большинстве случаев им можно пренебречь и считать процесс истечения адиабатным ( $q_{\text{внеш}} = 0$ )

При этом, уравнение первого закона термодинамики для потока примет вид

$$(c_2^2 - c_1^2)/2 = h_1 - h_2$$

Следовательно ускорение адиабатного потока происходит за счёт уменьшения энтальпии, а торможение потока вызывает её увеличение, т.е. располагаемая работа при адиабатном расширении равна располагаемому теплоперепаду.

При решении задач, связанных с истечением газа или пара через сопла (насадки), чаще всего приходится определять скорость истечения и расход, т.е. количество газа или пара, вытекающего в единицу времени.

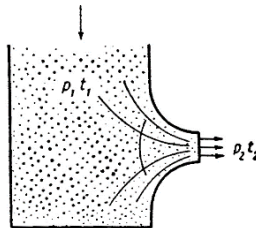


Рисунок 12.1 – Истечение газа или пара через сопло

В этих случаях необходимо прежде всего найти отношение  $\frac{p_2}{p_1}$ , где  $p_2$  – давление среды на выходе из сопла;  $p_1$  – давление среды на входе в сопло.

Полученное числовое значение  $\frac{p_2}{p_1}$  сравнивают с критическим отношением давлений для данного газа.

$$\text{Для одноатомных газов } \left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{\text{кр}} = 0,487;$$

Для двухатомных газов  $(\frac{p_2}{p_1})_{кр}=0,528$ ; для трёх- и многоатомных газов  $(\frac{p_2}{p_1})_{кр}=0,546$ .

1) Если адиабатное истечение газа происходит при  $\frac{p_2}{p_1} > (\frac{p_2}{p_1})_{кр}$ , то *теоретическая*

*скорость газа* у устья суживающегося сопла определяется по формуле

$$c = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_1 v_1 [1 - (\frac{p_2}{p_1})^{\frac{k-1}{k}}]}, \text{ где } k - \text{показатель адиабаты;}$$

$v_1$  - удельный объём газа на входе в сопло.

Для идеального газа *теоретическая скорость*, м/с, определяется по формуле

$$c = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} R T_1 [1 - (\frac{p_2}{p_1})^{\frac{k-1}{k}}]},$$

В формулах (1) и (2) значения  $p$ ,  $v$ ,  $R$  даны соответственно в следующих единицах: Па, кг/м<sup>3</sup>, Дж/(кг·К).

*Теоретическая скорость газа*, м/с, может быть найдена

$$c = \sqrt{2(h_1 - h_2)}, \quad (3)$$

где  $h_1$  и  $h_2$  - соответственно энтальпии газа в начальном и конечном состояниях, Дж/кг.

*Расход газа* определяется по формуле

$$M = f \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{v_1} [(\frac{p_2}{p_1})^{\frac{2}{k}} - (\frac{p_2}{p_1})^{\frac{k+1}{k}}]},$$

где  $S$  - выходное сечение сопла, м<sup>2</sup>.

2) Если адиабатное истечение газа происходит при  $\frac{p_2}{p_1} \leq (\frac{p_2}{p_1})_{кр}$ , то *теоретическая*

*скорость газа* у устья суживающегося сопла будет равна критической скорости и определяется по формуле

$$c_{кр} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} p_1 v_1}$$

Для двухатомных газов *критическая скорость* определится

$$c_{кр} = 1,08 \sqrt{p_1 v_1} \quad \text{или} \quad c_{кр} = 1,08 \sqrt{R T_1}$$

*Критическая скорость газа*, м/с, может быть найдена

$$c_{кр} = \sqrt{2(h_1 - h_{кр})},$$

где  $h$  - энтальпия газа при критическом давлении  $p_{кр}$ , Дж/кг.

*Расход газа в этом случае будет максимальным* и определится

$$M_{\max} = f \sqrt{2 \frac{k}{k+1} (\frac{2}{k+1})^{\frac{2}{k-1}} \frac{p_1}{v_1}},$$

Для двухатомных газов

$$M_{\max} = 0,686 f \sqrt{\frac{p_1}{v_1}},$$

Для трёхатомных газов

$$M_{\max} = 0,667 f \sqrt{\frac{p_1}{v_1}},$$

Для получения скоростей истечения выше критических (сверхзвуковые скорости) применяется расширяющееся сопло, или сопло Лавала (рисунок 2) в минимальном сечении сопла Лавала скорость движения газа равна критической скорости или скорости звука, определяемой параметрами  $p_{кр}$  и  $v_{кр}$ .

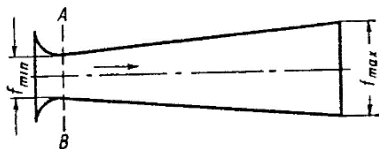


Рисунок 12.2 – Сопло Лавала

Площадь минимального сечения сопла определяется по формуле

$$S_{\min} = \frac{M_{\max} v_{кр}}{c_{кр}} \quad (12)$$

Для двухатомных газов

$$S_{\min} = \frac{M_{\max}}{0,686 \sqrt{\frac{p_1}{v_1}}}$$

Для трёхатомных газов

$$S_{\min} = \frac{M_{\max}}{0,667 \sqrt{\frac{p_1}{v_1}}}$$

$$\text{Длина расширяющейся части сопла} \quad l = \frac{d - d_{\min}}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}},$$

где  $d$  и  $d_{\min}$  - соответственно диаметры входного и минимального сечений;  
 $\alpha$  – угол конусности расширяющейся части сопла.

### Дросселирование (мятие) газов и паров

Дросселирование (мятие) – процесс, при котором газ или пар проходит через суженное сечение, происходящее со снижением его давления.

При дросселировании газа или пара со снижением давления всегда возрастает удельный объём. Температура идеальных газов при дросселировании остаётся неизменной, температура же реальных газов остаётся постоянной лишь при одной определённой начальной температуре газа, называемой *температурой инверсии*.

Приближенное значение температуры инверсии определяется по формуле

$$T_{инв} \approx 6,75 T_{кр},$$

где  $T_{кр}$  - критическая температура газа или пара, К.

Если же температура подвергающегося дросселированию газа отлична от температуры инверсии, то его температура изменяется: уменьшается, если температура газа

меньше температуры инверсии и увеличивается, если температура его больше температуры инверсии.

При дросселировании энтальпия газа или пара в начальном и конечном состояниях одинакова, т.е.  $h_1 = h_2$ .

Задачи, связанные с дросселированием пара, обычно сводятся к определению параметров состояния пара после дросселирования. Проще всего они решаются при помощи  $is$ -диаграммы. Так как в начальном и конечном состояниях энтальпия пара одинакова, то конечное состояние пара определяется пересечением горизонтали, проходящей через начальную точку 1 рисунок 3, с изобарой конечного давления  $p_2$ . Точка 2 определяет все параметры после дросселирования.

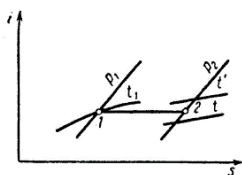


Рисунок 12.3 – Определение параметров состояния пара в  $is$ -диаграмме.

## Циклы поршневых компрессоров, ДВС и ГТУ

### Теоретические циклы поршневого компрессора

На рисунке 13.1 в  $p$ - $v$ -диаграмме изображены процессы, протекающие в идеальном компрессоре. Линия 4-1 изображает процесс всасывания газа, 1-2 – процесс сжатия, 2-3 – процесс нагнетания. Диаграмма 1-2-3-4 называется теоретической индикаторной диаграммой.

Теоретическая работа компрессора зависит от процесса сжатия. Кривая 1-2 – процесс изотермического сжатия, 1-2'' – адиабатного сжатия и 1-2' – политропного сжатия.

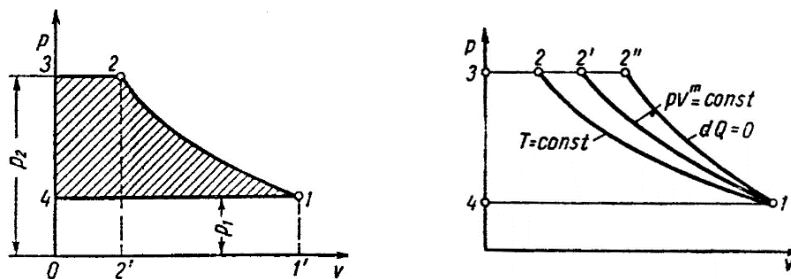


Рисунок 13.1 - Теоретический цикл поршневого компрессора

**При изотермическом сжатии** теоретическая работа компрессора равна работе изотермического сжатия

$$l = p_1 v_1 \ln \frac{p_2}{p_1} = R T \ln \frac{p_2}{p_1}$$

Работа, отнесённая к  $1 \text{ м}^3$  всасываемого воздуха  $l_0 = p_1 \ln \frac{p_2}{p_1}$

Работа для получения  $1 \text{ м}^3$  сжатого воздуха  $l_0'' = p_2 \ln \frac{p_2}{p_1}$

Количество теплоты, которое должно быть отведено при изотермическом сжатии

$$q = l_0 \text{ или } Q = L_0$$

**При адиабатном сжатии** теоретическая работа компрессора в  $k$  раз больше работы адиабатного сжатия

$$l_0 = \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

Работа, отнесённая к  $1 \text{ м}^3$  всасываемого воздуха

$$l'_0 = \frac{k}{k-1} p_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

Работа для получения  $1 \text{ м}^3$  сжатого воздуха

$$l''_0 = \frac{k}{k-1} p_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$$

**При политропном сжатии** теоретическая работа компрессора в  $m$  раз больше

$$\text{работы политропного сжатия} \quad l_0 = \frac{m}{m-1} p_1 v_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]$$

Теоретическая мощность двигателя для привода компрессора

$$N = \frac{L_0}{3600 \cdot 1000}, \text{ Вт (кВт)}$$

### Теоретические циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания

**а) цикл с подводом теплоты при постоянном объёме (цикл Отто)** состоит из двух адиабат и двух изохор (рисунок 13.2). Характеристиками цикла являются степень сжатия  $\varepsilon$  и степень повышения давления  $\lambda$ .



Рисунок 13.2 – Цикл с подводом теплоты при постоянном объёме в PV-диаграмме и TS-диаграмме

Степень сжатия определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$$

Степень повышения давления определяется по формуле

$$\lambda = \frac{p_3}{p_2}$$

Количество подведённой теплоты определяется по формуле

$$q_1 = \bar{c}_v (T_3 - T_2)$$

Количество отведённой теплоты определяется по формуле

$$q_2 = \bar{c}_v (T_4 - T_1)$$

Работа цикла определяется по формуле

$$l_0 = q_1 - q_2$$

Термический к.п.д. цикла определяется по формуле

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$

б) **цикл с подводом теплоты при постоянном давлении (цикл Дизеля)** состоит из двух адиабат, одной изобары и одной изохоры (рисунок 13.3). Характеристиками цикла являются степень сжатия  $\varepsilon$  и степень предварительного расширения  $\rho$ .



Рисунок 13.3 – Цикл с подводом теплоты при постоянном давлении в PV-диаграмме и TS-диаграмме

Степень сжатия определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$$

Степень предварительного расширения давления определяется по формуле

$$\rho = \frac{v_3}{v_2}$$

Количество подведённой теплоты определяется по формуле

$$q_1 = \bar{c}_v(T_3 - T_2)$$

Количество отведённой теплоты (абсолютное значение) определяется по формуле

$$q_2 = \bar{c}_v(T_4 - T_1)$$

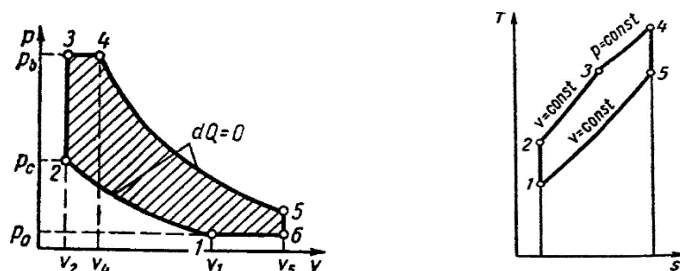
Работа цикла определяется по формуле

$$l_0 = q_1 - q_2$$

Термический к.п.д. цикла определяется по формуле

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

в) **цикл с комбинированным подводом теплоты (цикл Тринклера)** состоит из двух адиабат, двух изохор и одной изобары (рисунок 13.4).



### Рисунок 13.4 – Цикл с комбинированным подводом теплоты PV-диаграмме и TS-диаграмме

Характеристиками цикла являются степень сжатия  $\varepsilon$ , степень повышения давления  $\lambda$  и степень предварительного расширения  $\rho$ .

Степень сжатия определяется по формуле  $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$

Степень повышения давления определяется по формуле

$$\lambda = \frac{P_3}{P_2}$$

Степень предварительного расширения давления определяется по формуле

$$\rho = \frac{v_4}{v_3}$$

Количество подведённой теплоты определяется по формуле

$$q_1 = \bar{c}_v(T_3 - T_2) - \bar{c}_p(T_4 - T_3)$$

Количество отведённой теплоты (абсолютное значение) определяется по формуле

$$q_2 = \bar{c}_v(T_5 - T_1)$$

Термический к.п.д. цикла определяется по формуле

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda \rho^k - 1}{\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)}$$

### Циклы газотурбинных установок

На рисунке 13.5 представлена схема наиболее распространённого типа газотурбинной установки со сгоранием топлива при постоянном давлении.

**К**-компрессор;

**Т**-турбина;

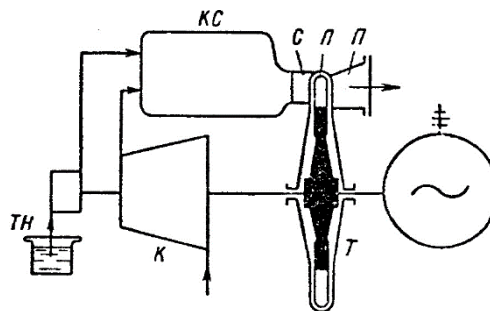
**КС**-камера сгорания;

**ТН**-топливный насос;

**С**-сопла;

**Л**-рабочие лопатки турбины;

**П**-выпускной патрубок



### Рисунок 13.5 – Схема газотурбинной установки

Компрессор К, расположенный на одном валу с турбиной Т, всасывает воздух из атмосферы и сжимает его до заданного давления. Сжатый в компрессоре воздух поступает в камеру сгорания КС; туда же топливным насосом ТН подаётся жидкое горючее. Сгорание происходит при постоянном давлении. Из камеры сгорания газы поступают в сопла С, из которых они с большой скоростью поступают на рабочие лопатки Л турбины и приводят во вращение её ротор. Отработавшие газы через выпускной патрубок П выпускаются в атмосферу.

**а) теоретический цикл турбины с подводом теплоты при постоянном давлении** (рисунок 13.6). Цикл состоит из двух адиабат и двух изобар. Линия 1-2 изображает процесс адиабатного сжатия в компрессоре, 2-3 – изобарный подвод теплоты (сгорание топлива), 3-



4 – адиабатное расширение в турбине, 4-1 – условный изобарный процесс, замыкающий цикл.

Термический к.п.д. цикла определяется по формуле

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \quad \text{или} \quad \eta_t = 1 - \frac{1}{\lambda^k}$$

где  $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$  – степень сжатия;

$\lambda = \frac{P_2}{P_1}$  – степень повышения давления.

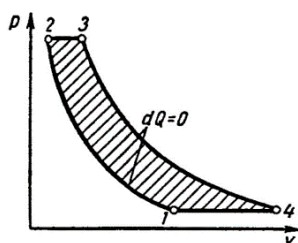


Рисунок 13.6 - Теоретический цикл турбины с подводом теплоты при постоянном давлении

*б) теоретический цикл турбины с подводом теплоты при постоянном объёме* (рисунок 13.7). Цикл состоит из двух адиабат, одной изохоры и одной изобары. Линия 1-2 изображает процесс адиабатного сжатия в компрессоре, 2-3 – изохорный подвод теплоты, 3-4 – адиабатное расширение в турбине, 4-1 – условный изобарный процесс, замыкающий цикл.

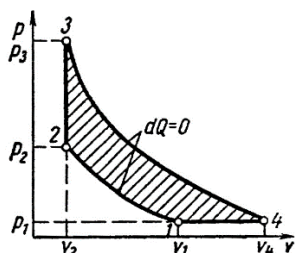


Рисунок 13.7 - Теоретический цикл турбины с подводом теплоты при постоянном объёме.

Термический к.п.д. цикла определяется по формуле

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda^{\frac{1}{k}} - 1}{\lambda - 1}$$

где  $\lambda = \frac{P_3}{P_2}$  – степень повышения давления.

*в) теоретический цикл турбины с подводом теплоты при постоянном давлении и регенерации; при постоянном объёме и регенерации* (рисунок 13.8).

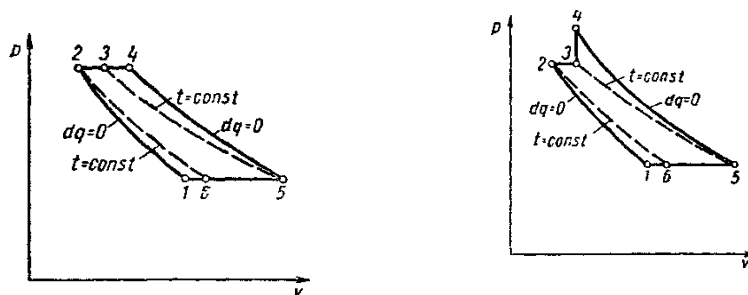


Рисунок 13.8 - Теоретический цикл турбины с подводом теплоты при постоянном давлении и регенерации и при постоянном объёме и регенерации

Так как уходящие из турбины продукты сгорания имеют достаточно высокую температуру, то для повышения экономичности турбины вводят регенерацию.

*Регенерация* – предварительный подогрев сжатого в компрессоре воздуха за счёт теплоты уходящих газов. Термический к.п.д. турбины при наличии регенерации больше, чем без неё.

*Цикл с предельной (полной) регенерацией* – цикл, при котором вся располагаемая теплота отработавших газов используется для подогрева воздуха.

В обоих циклах линии 2-3 изображают изобарный подогрев сжатого воздуха в регенераторе, а линии 5-6 – изобарное охлаждение продуктов сгорания в регенераторе.

*Термический к.п.д. цикла турбины при  $p=\text{const}$  с предельной регенерацией и адиабатным сжатием* определяется по формуле

$$\eta_{\text{тпр}} = 1 - \frac{T_1}{T_5}$$

## Циклы паросиловых и холодильных установок

### 1 Паросиловой цикл Ренкина

На рисунке 14.1 представлена условная схема паросиловой установки.

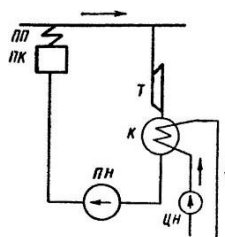
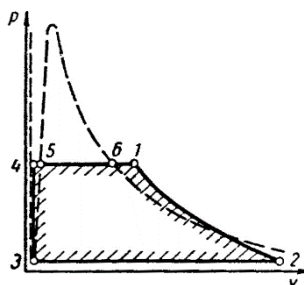


Рисунок 14.1 – Схема паросиловой установки

ПК – паровой котёл; ПП – пароперегреватель; Т – турбина; К – конденсатор; ЦН – циркуляционный насос; ПН – питательный насос.

Пар из парового котла ПК поступает в пароперегреватель ПП, откуда он направляется в турбину Т и далее в конденсатор К. В конденсаторе с помощью охлаждающей воды, подаваемой циркуляционным насосом ЦН, от пара отводится теплота, и он конденсируется. Образовавшийся конденсат питательным насосом ПН подаётся в котёл, и цикл повторяется вновь.



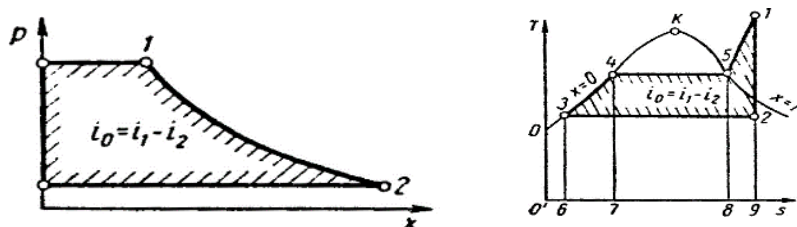
#### Рисунок 14.2 - Теоретический цикл Ренкина в $p$ - $v$ -диаграмме

Точка 3 характеризует состояние воды на выходе из конденсатора; линия 3-4 – процесс повышения давления в ПН; 4-5 – подогрев воды в ПК; точка 5 – состояние воды при температуре насыщения; 5-6 – парообразование в ПК; 6-1 – перегрев пара в пароперегревателе.

Точка 1 – состояние пара, поступившего в турбину; 1-2 – адиабатное расширение пара в турбине.

Точка 2 – состояние отработавшего пара, выходящего из турбины; 2-3 – процесс конденсации пара в конденсаторе.

Так как по сравнению с объёмами пара объёмы жидкости очень малы, то ими при не очень высоких давлениях пренебрегают. Кривая процесса сжатия жидкости при этом совпадает с осью ординат, и цикл получает вид, изображённый на рисунке 3.



#### Рисунок 14.3 - Кривая процесса сжатия жидкости в $PV$ -диаграмме и $Ts$ -диаграмме

В  $Ts$ -диаграмме кривая 3-4 изображает нагревание воды в ПК. Точка 4 соответствует температуре кипящей воды при давлении  $P_1$  в ПК. Площадь, лежащая под кривой 3-4 измеряет количество теплоты, подведённой к воде при её нагреве до точки кипения. Прямая 4-5 – процесс парообразования. Точка 5 соответствует состоянию сухого насыщенного пара.

Площадь 4-5-8-7-4 соответствует теплоте парообразования  $q$ . Кривая 5-1 изображает процесс перегрева пара в ПП, а точка 1 – состояние перегретого пара после ПП.

Площадь 5-1-9-8-5, лежащая под кривой 5-1, соответствует теплоте перегрева, площадь 0-4-5-1-9-0'-0 – энтальпии ( $h_1$ ) перегретого пара в точке 1. Энтальпия воды ( $h'_2$ ), поступающей в ПК, изображается площадью 0-3-6-0'-0.

Таким образом, для получения 1 кг пара в ПК затрачивается  $h_1 - h_2$  единиц теплоты (площадь 3-4-5-1-9-6-3).

Прямая 1-2 изображает адиабатное расширение пара в турбине. Точка 2 соответствует состоянию отработавшего пара при давлении  $P_2$ . Его энтальпия ( $h_2$ ) изображается площадью 0-3-2-9-0'-0. Прямая 2-3 – процесс конденсации пара, площадь 2-3-6-9-2, лежащая под прямой 2-3, соответствует количеству теплоты, отнимаемой от 1 кг пара в К, т.е. площадь 2-3-6-9-2 =  $h_2 - h'_2$ .

Таким образом, количество теплоты, подведённой к 1 кг пара в этом цикле, равно  $h_1 - h'_2$ .

Количество теплоты, отведённой от 1 кг пара, равно  $h_2 - h'_2$ , следовательно, количество теплоты, затраченной на производство работы и отнесённой к 1 кг пара, составляет

$$h_1 - h_2 = l_0,$$

и изображается площадью 3-4-5-1-2-3.

Термический к.п.д. цикла Ренкина – это отношение полезно использованной теплоты ко всей затраченной

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h'_2},$$

где  $h_1$  и  $h_2$  – начальное и конечное значения энтальпии пара в адиабатном процессе его расширения в турбине;  $h'_2$  – энтальпия кипящей жидкости (конденсата) при давлении  $p_2$ .

## 2 Регенеративный цикл

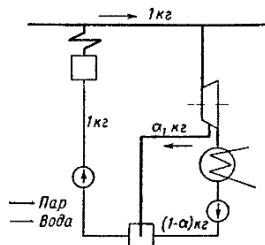


Рисунок 14.5 - Схема установки с регенеративным подогревом питательной воды

Эффективным способом повышения к.п.д. паросиловых установок служит регенерация. На рисунке 11.5 показана схема установки с регенеративным подогревом питательной воды. Эта схема отличается от схемы 11.1 тем, что не весь пар, поступающий в турбину, расширяется до конечного давления, а часть его отбирается при некотором промежуточном давлении и направляется в подогреватель, куда одновременно подаётся конденсат.

## 3 Цикл воздушной холодильной установки

Холодильные установки служат для искусственного охлаждения тел ниже температуры окружающей среды. Рабочее тело в холодильных машинах совершает обратный круговой процесс, в котором в противоположность прямому циклу затрачивается работа извне и отнимается теплота от охлаждаемого тела.

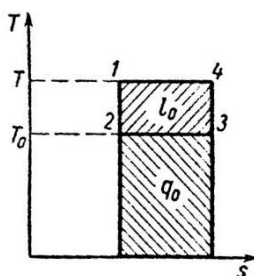


Рисунок 14.6 - Идеальный цикл холодильных установок (обратный цикл Карно)

Идеальным циклом холодильных установок является обратный цикл Карно (рисунок 14.6). В результате осуществления этого цикла затрачивается работа  $l_0$  и тепло  $q$  от холодного тела переносится к более нагретому телу.

Отношение отведённой от охлаждаемого тела теплоты  $q_0$  (произведённого холода) к затраченной работе  $q - q_0$  называется *холодильным коэффициентом* и является характеристикой экономичности холодильной машины:

$$\varepsilon = \frac{q_0}{q - q_0} = \frac{q_0}{l_0}$$

Максимальное значение холодильного коэффициента при заданном температурном интервале равно холодильному коэффициенту обратного цикла Карно

$$\varepsilon_k = \frac{T}{T - T_0}$$

Отношение  $\frac{\varepsilon}{\varepsilon_k}$  характеризует степень термодинамического совершенства

применяемого цикла.

В качестве холодильных агентов применяют воздух и жидкости с низкими температурами кипения: аммиак, углекислоту, сернистый ангидрид, фреоны (галогидные производные насыщенных углеводородов).

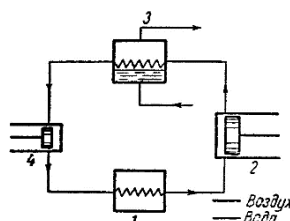


Рисунок 14.7 - Схема воздушной холодильной установки

- 1 – охлаждаемое помещение (холодильная камера), в которой по трубам циркулирует охлаждённый воздух;
- 2 – компрессор, всасывающий этот воздух и сжимающий его;
- 3 – охладитель, в котором охлаждается сжатый в компрессоре воздух;
- 4 – расширительный цилиндр, в котором воздух расширяется, совершая при этом работу и понижая свою температуру.

Из расширительного цилиндра холодный воздух направляют в холодильную камеру, где он, отнимая теплоту от охлаждаемых тел, нагревается и вновь поступает в компрессор. В дальнейшем этот цикл повторяется.

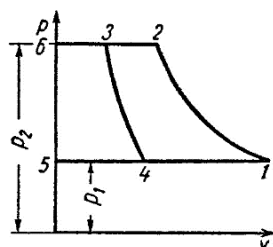


Рисунок 14.8 - Теоретический цикл воздушной холодильной установки в p-v диаграмме.

Точка 1 характеризует состояние воздуха, поступающего в компрессор; 1-2 – процесс адиабатного сжатия в компрессоре; точка 2 – состояние воздуха, поступающего в охладитель; точка 3 - состояние воздуха, поступающего в расширительный цилиндр; 3-4 – адиабатный процесс расширения; точка 4 – состояние воздуха, поступающего в холодильную камеру; 4-1 – процесс нагревания воздуха в этой камере.

Площадь 1-2-6-5-1 измеряет работу, затраченную компрессорами на сжатие, а площадь 3-6-5-4-3 – работав расширительном цилиндре.

Следовательно, затрата работы в теоретическом цикле воздушной холодильной установки измеряется площадью 1-2-3-4, а количество теплоты, отнятой от охлажденных тел, равно количеству теплоты, воспринятой воздухом в процессе 4-1.

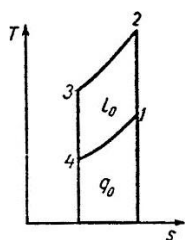


Рисунок 14.9 - Теоретический цикл воздушной холодильной установки в Ts-диаграмме.

Площадь, лежащая под кривой 4-1 соответствует количеству теплоты  $q_0$ , отведённой от охлаждаемых тел; площадь, лежащая под кривой 1-2, соответствует количеству теплоты, переданной охлаждающей воде в охладителе, а площадь 1-2-3-4-1 – работе, затраченной в цикле.

Холодопроизводительность 1 кг воздуха  $q_0$  определяется

$$q_0 = h_1 - h_4 = c_{pm}(T_1 - T_4),$$

где  $T_1$  – температура воздуха, выходящего из холодильной камеры и поступающего в компрессор;  $T_2$  – температура воздуха, входящего в холодильную камеру;  $c_{pm}$  – средняя массовая теплоёмкость воздуха при постоянном давлении.

Работа, затраченная компрессором, определяется

$$l_k = h_2 - h_1 = c_{pm}(T_2 - T_1),$$

где  $T_2$  – температура воздуха после его сжатия в компрессоре.

Работа, полученная в расширительном цилиндре, определяется

$$l_{p.ц.} = h_3 - h_4 = c_{pm}(T_3 - T_4),$$

где  $T_3$  – температура воздуха перед расширительным цилиндром.

Работа, затраченная в цикле, определяется

$$l_0 = l_k - l_{p.ц.}$$

Расход холодильного агента определяется

$$M = \frac{Q_0}{q_0},$$

где  $Q_0$  и  $q_0$  – соответственно холодопроизводительность установки и холодопроизводительность 1 кг воздуха,  $\frac{\text{кДж}}{\text{с}}$  и  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ .

Холодильный коэффициент

$$\varepsilon = \frac{q_0}{q - q_0} = \frac{q_0}{l_0} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} = \frac{T_4}{T_3 - T_4}$$

Теоретическая мощность, необходимая для привода компрессора, кВт, определяется

$$N_{теор} = M l_0$$

Основным недостатком воздуха как холодильного агента является его малая теплоёмкость, а следовательно, и малое количество теплоты, отнимаемой от охлаждаемого тела одним килограммом агента. Из-за этого, а также других причин воздушные холодильные установки в настоящее время не имеют широкого распространения.

## Термодинамика газовых циклов

### Газовые циклы реактивных двигателей и газотурбинных установок

Недостатки поршневых двигателей внутреннего сгорания: ограниченная мощность из-за периодичности их действия и невозможность полного адиабатного расширения ТРТ до давления окружающей среды, не позволили их использовать при больших скоростях полета. Поэтому при больших дозвуковых и при сверхзвуковых скоростях полета на летательных аппаратах устанавливаются различные типы реактивных двигателей.

Реактивные двигатели и газотурбинные установки обладают тем преимуществом по сравнению с поршневыми ДВС, что это двигатели непрерывного действия и могут реализовать любые потребные мощности. Кроме того, реактивные двигатели и газотурбинные установки позволяют осуществить более экономичные термодинамические циклы полного расширения ТРТ до давления окружающей среды.

#### Цикл Брайтона

Цикл Брайтона – это прямой газовый изобарный цикл полного расширения, состоящий из двух адиабатных и двух изобарных процессов:

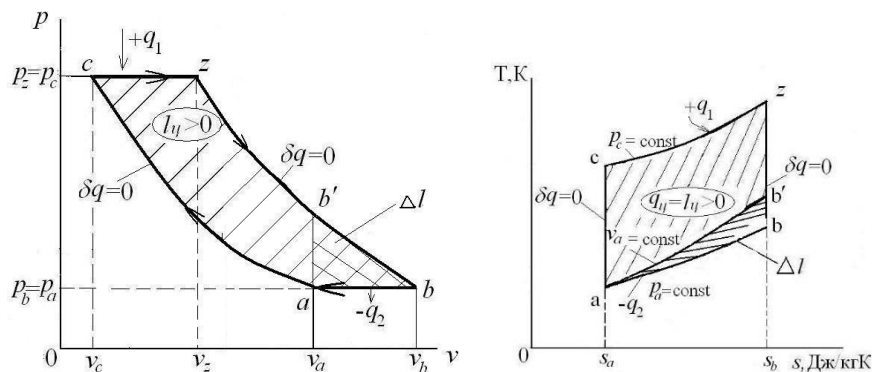


Рисунок 18. – Цикл Брайтона – прямой газовый изобарный цикл полного расширения где  $ac$  – адиабатное сжатие в диффузоре и компрессоре реактивного двигателя (ТРД);  $cz$  – изобарный подвод теплоты  $q_1$  (в камеру сгорания ТРД);  $zb$  – адиабатное расширение продуктов сгорания на турбине и в реактивном сопле двигателя;  $ba$  – изобарный охлаждение выпускных газов в окружающей среде. Совокупность этих процессов образует цикл с положительной результирующей работой  $l_{\delta} > 0$ .

Основные характеристики (параметры) цикла:

- степень сжатия  $\varepsilon = v_a / v_c$ , или степень повышения давления в процессе сжатия  $\Pi = \frac{P_c}{P_a}$ ;

- степень предварительного изобарного расширения ТРТ  $\rho = v_z / v_c$ .

Тогда термический КПД цикла Брайтона будет равен:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} = 1 - \frac{1}{\Pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}.$$

С ростом степени сжатия  $\varepsilon$  (или степени повышения давления  $\Pi$ ) термический КПД цикла Брайтона возрастает за счет более глубокого расширения газа, т.к. снижается температура  $T_b$  и теплота  $q_2$ , отданная холодильнику. Результирующая работа цикла Брайтона больше работы цикла неполного расширения (цикла Дизеля) на величину  $\Delta I$  при

одинаковых степенях сжатия ТРТ и подведенной теплоты  $q_1$ , что позволяет осуществить более экономичный термодинамический цикл полного расширения.

### Цикл Гемфри

Цикл Гемфри – это прямой газовый изохорный цикл полного расширения. Этот цикл был реализован в пульсирующем прямоточном воздушно-реактивном двигателе, установленном на немецкой крылатой ракете Фау-1. В  $p$ - $v$  и  $T$ - $s$  координатах этот цикл представлен на следующих рисунках:

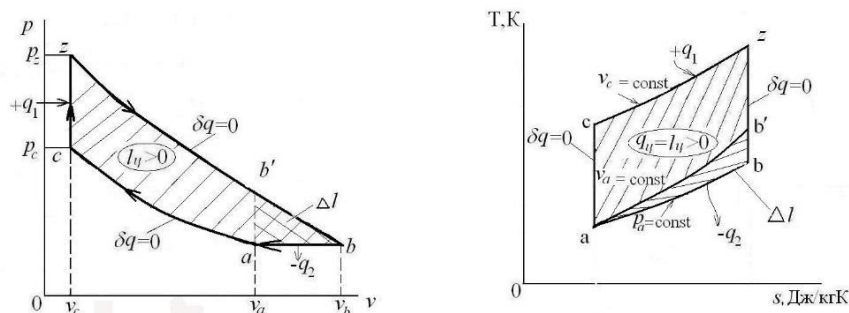


Рисунок 19. – Цикл Гемфри –прямой газовый изохорный цикл полного расширения где  $ac$  –сжатие воздуха по адиабате в диффузоре или компрессоре;  $cz$  –подвод теплоты  $q_1$  по изохоре;  $zb$  – адиабатное расширение продуктов сгорания на турбине или в реактивном сопле;  $ba$  – изобарное охлаждение выхлопных газов в окружающей среде.

Основные характеристики (параметры) цикла:

- степень сжатия  $\varepsilon = v_a / v_c$ , или степень повышения давления в процессе сжатия  $\Pi = p_c / p_a$ ;
- степень повышения давления в процессе подвода теплоты  $q_1$  по изохоре  $\lambda = p_z / p_c$ .

Термический кпд цикла Гемфри равен:

$$\eta_t = 1 - \kappa \frac{\left( \begin{matrix} 1 \\ \lambda^{\kappa} - 1 \end{matrix} \right)}{\varepsilon^{\kappa-1} (\lambda - 1)}, \quad \text{или} \quad \eta_t = 1 - \kappa \frac{\left( \begin{matrix} 1 \\ \lambda^{\kappa} - 1 \end{matrix} \right)}{\Pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} (\lambda - 1)}.$$

Таким образом, термический кпд цикла Гемфри является прямой функцией степени сжатия  $\varepsilon$  (или  $\Pi$ ) и степени повышения давления в процессе подвода теплоты  $q_1$  по изохоре  $\lambda$ .

### Цикл жидкостного ракетного двигателя

ЖРД – это ракетный двигатель, работающий на жидком ракетном топливе. ЖРД был предложен К.Э. Циолковским (1857-1935) как двигатель для полетов в Космосе в 1903 году. Идеальный цикл ЖРД – прямой газовый изобарный цикл полного расширения:

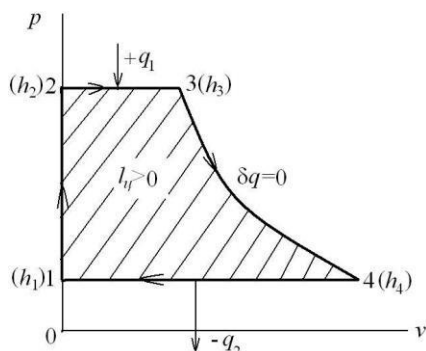




Рисунок 20. – Цикл жидкостного ракетного двигателя

где 1-2 – изохорный процесс сжатия и нагнетания жидких компонентов топлива в камеру сгорания при помощи турбонасосного агрегата (ТНА). Принимается, что объем жидкости  $v_{ж} \ll v_{г}$ , где  $v_{г}$  – объем газообразных компонентов, т.е. пренебрегается удельным объемом  $v_{ж}$  по сравнению с удельным объемом  $v_{г}$ , и что энтальпия  $h_1=h_2=0$ , т.к. жидким компонентам топлива теплота не сообщается;

2-3 – изобарный процесс подвода теплоты  $q_1$ ;

3-4 – адиабатное расширение продуктов сгорания в сопле Лавалья;

4-1 – изобарный процесс отвода теплоты  $q_2$  в окружающую среду.

Эти процессы образуют цикл с положительной результирующей работой ( $l_u > 0$ ).

Термический кпд цикла ЖРД будет равен:

$$\eta_t = \frac{l_u}{q_1} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_1} = \frac{W^2}{2(h_3 - h_1)}.$$

Тогда можно сделать вывод, что при заданной теплоте источника термический кпд цикла ЖРД тем больше, чем больше степень расширения газа в сопле, т.е. чем больше разность энтальпий ( $h_3-h_4$ ), а результирующая работа цикла (располагаемая работа) целиком идет на создание кинетической энергии струи, вытекающих из сопла продуктов сгорания.

## Примеры решения задач

**Пример 1.** Определить молярную массу  $M$  углекислого газа  $\text{CO}_2$ .

*Решение.* Молярную массу данного вещества можно определить по формуле  $M = M_r k$ , (1) где  $M_r$  — относительная молекулярная масса вещества;  $k = 10^{-3}$  кг/моль.

Относительную молекулярную массу найдем из соотношения

$$M_r = \sum_i N_i A_{r,i}, \quad (2)$$

где  $N_i$  — число атомов  $i$ -го химического элемента, входящих в молекулу данного вещества;  $A_{r,i}$  — относительная атомная масса  $i$ -го химического элемента.

В нашем случае для углекислого газа формула (2) примет вид

$M_r = N_C A_{r,C} + N_O A_{r,O}$  (3) где  $N_C = 1$  (число атомов углерода в молекуле углекислого газа);  $N_O = 2$  (число атомов кислорода в той же формуле);  $A_{r,C}$  и  $A_{r,O}$  — относительные атомные массы углерода и кислорода.

По таблице Д. И. Менделеева найдем

$A_{r,C} = 12$ ,  $A_{r,O} = 16$ .

После подстановки в формулу (3) значений  $N_C$ ,  $N_O$ ,  $A_{r,C}$  и  $A_{r,O}$  получим

$$M_r = 1 \cdot 12 + 2 \cdot 16 = 44.$$

Подставив это значение относительной молекулярной массы, а также значение  $k$  в формулу (1), найдем молярную массу углекислого газа:

$$M = 44 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль} = 4,4 \cdot 10^{-2} \text{ кг/моль}.$$

**Пример 2.** Найти молярную массу  $M$  смеси кислорода массой  $m_1 = 25$  г и азота массой  $m_2 = 75$  г.

*Решение.* Молярная масса смеси  $M_{\text{см}}$  есть отношение массы смеси  $m_{\text{см}}$  к количеству вещества смеси  $n_{\text{см}}$  т. е.

$$M_{\text{см}} = m_{\text{см}} / n_{\text{см}}. \quad (1)$$

Масса смеси равна сумме масс компонентов смеси  $m_{\text{см}} = m_1 + m_2$ . Количество вещества смеси равно сумме количеств вещества компонентов.

Подставив в формулу (1) выражения  $m_{\text{см}}$  и  $n_{\text{см}}$ , получим

$$M_{\text{см}} = \frac{m_1 + m_2}{m_1 / M_1 + m_2 / M_2}$$

Применив способ, использованный в примере 1, найдем молярные массы  $M_1$  кислорода и  $M_2$ , азота:

$M_1 = 32 \cdot 10^{-3}$  кг/моль,  $M_2 = 28 \cdot 10^{-3}$  кг/моль. Подставим значения величин во (2) и произведем вычисления:

$$M_{\text{см}} = \frac{25 \cdot 10^{-3} + 75 \cdot 10^{-3}}{25 \cdot 10^{-3} / (32 \cdot 10^{-3}) + 75 \cdot 10^{-3} / (28 \cdot 10^{-3})} \text{ кг/моль} = 28,9 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

**Пример 3.** В баллоне объемом  $V = 10$  л находится гелий под давлением  $p_1 = 1$  МПа при температуре  $T_1 = 300$  К. После того как из баллона был израсходован гелий массой  $m = 10$  г, температура в баллоне понизилась до  $T_2 = 290$  К. Определить давление  $p_2$  гелия, оставшегося в баллоне.

*Решение.* Для решения задачи воспользуемся уравнением Клапейрона — Менделеева, применив его дважды к начальному и конечному состояниям газа. Для начального состояния уравнение имеет вид

$$p_1 V = (m_1 / M) R T_1, \quad (1)$$

а для конечного состояния —

$$p_2 V = (m_2/M) R T_2, \quad (2)$$

где  $m_1$  и  $m_2$  — массы гелия в начальном и конечном состояниях.

Выразим массы  $m_1$  и  $m_2$  гелия из уравнений (1) и (2):

$$m_1 = M p_1 V / (R T_1); \quad (3)$$

$$m_2 = M p_2 V / (R T_2); \quad (4)$$

Вычитая из (3) равенство (4), получим

$$m = m_1 - m_2 = \frac{M p_2 V}{R T_1} - \frac{M p_2 V}{R T_2}.$$

Отсюда найдем искомое давление:

$$p_2 = \frac{R T_2}{M V} \left( \frac{M p_1 V}{R T_1} - m \right) = \frac{T_2}{T_1} p_1 - \frac{m R T_2}{M V}.$$

$$p_2 = \frac{290}{300} \cdot 10^6 - \frac{10 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{8,31 \cdot 290}{10 \cdot 10^{-3}} \text{ Па} = 3,64 \cdot 10^5 \text{ Па} = 364 \text{ кПа}.$$

**Пример 4.** Вычислить удельные теплоемкости неона и водорода при постоянных объеме ( $c_v$ ) и давлении ( $c_p$ ), принимая эти газы за идеальные.

*Решение.* Удельные теплоемкости идеальных газов выражаются формулами

$$c_v = \frac{i}{2} \frac{R}{M}; \quad (1)$$

$$c_p = \frac{i+2}{2} \frac{R}{M}. \quad (2)$$

Для неона (одноатомный газ)  $i_1=3$ ,  $M_1=20 \cdot 10^{-3}$  кг/моль.

Подставив в формулы (1) и (2) значения  $i_1$ ,  $M_1$  и  $R$  и произведя вычисления, найдем:

$$c_{v1} = 624 \text{ Дж/(кг·К)}; \quad c_{p1} = 1,04 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Для водорода (двухатомный газ)  $i_2=5$ ,  $M_2=2 \cdot 10^{-3}$  кг/моль.

Вычисление по формулам (1) и (2) дает следующие значения удельных теплоемкостей водорода:

$$c_{v2} = 10,4 \text{ кДж/(кг·К)}; \quad c_{p2} = 14,6 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

**Пример 5.** Вычислить удельные теплоемкости  $c_v$  и  $c_p$  смеси неона и водорода. Массовые доли газов соответственно равны  $\omega_1=0,8$  и  $\omega_2=0,2$ . Значения удельных теплоемкостей газов взять из примера 3.

*Решение.* Удельную теплоемкость смеси при постоянном объеме  $c_v$  найдем из следующих рассуждений. Теплоту, необходимую для нагревания смеси на  $\Delta T$ , выразим двумя соотношениями:

$$Q = c_v (m_1 + m_2) \Delta T \quad (1)$$

где  $c_v$  — удельная теплоемкость смеси;  $m_1$  — масса неона;  $m_2$  — масса водорода, и

$$Q = (c_{v1} m_1 + c_{v2} m_2) \Delta T \quad (2)$$

где  $c_{v1}$  и  $c_{v2}$  — удельные теплоемкости неона и водорода соответственно.

Приравняв правые части выражений (1) и (2) и разделив обе части полученного равенства на  $\Delta T$ , найдем

$$c_v (m_1 + m_2) = c_{v1} m_1 + c_{v2} m_2,$$

откуда

$$c_v = c_{v1} \frac{m_1}{m_1 + m_2} + c_{v2} \frac{m_2}{m_1 + m_2}$$

Отношения  $\omega_1 = m_1/(m_1+m_2)$  и  $\omega_2 = m_2/(m_1+m_2)$  выражают массовые доли соответственно неона и водорода. С учетом этих обозначений последняя формула, примет вид

$$c_v = c_{v1}\omega_1 + c_{v2}\omega_2.$$

Подставив в эту формулу числовые значения величин, найдем  $c_v = 2,58 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ .

Рассуждая таким же образом, получим формулу для вычисления удельной теплоёмкости смеси при постоянном давлении:

$$c_p = c_{p1}\omega_1 + c_{p2}\omega_2$$

Произведя вычисления по этой формуле, найдем

$$c_p = 3,73 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

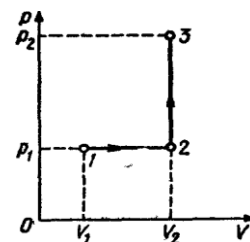


Рис. 11.1

**Пример 6.** Определить количество теплоты, поглощаемой водородом массой  $m=0,2 \text{ кг}$  при нагревании его от температуры  $t_1=0^\circ\text{C}$  до температуры  $t_2=100^\circ\text{C}$  при постоянном давлении. Найти также изменение внутренней энергии газа и совершаемую им работу.

*Решение.* Количество теплоты  $Q$ , поглощаемое газом при изобарном нагревании, определяется по формуле

$$Q = mc_p \Delta T, \quad (1)$$

где  $m$  — масса нагреваемого газа;  $c_p$  — его удельная теплоемкость при постоянном давлении;  $\Delta T$  — изменение температуры газа.

Как известно,  $c_p = \frac{i+2}{2} \frac{R}{M}$ . Подставив это выражение  $c_p$  в формулу (1), получим

$$Q = m \frac{i+2}{2} \frac{R}{M} \Delta T$$

Произведя вычисления по этой формуле, найдем

$$Q = 291 \text{ кДж}.$$

Внутренняя энергия выражается формулой  $U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT$ , следовательно, изменение внутренней энергии

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta T.$$

После подстановки в эту формулу числовых значений величин и вычислений получим  $\Delta U = 208 \text{ кДж}$ .

Работу расширения газа определим по формуле, выражающей первое начало термодинамики:  $Q = \Delta U + L$ , откуда

$$L = Q - \Delta U.$$

Подставив значения  $Q$  и  $\Delta U$ , найдем

$$L = 83 \text{ кДж}.$$

**Пример 7.** Кислород занимает объем  $V_1=1 \text{ м}^3$  и находится под давлением  $p_1=200 \text{ кПа}$ . Газ нагрели сначала при постоянном давлении до объема  $V_2=3 \text{ м}^3$ , а затем при постоянном объеме до давления  $p_2=500 \text{ кПа}$ . Построить график процесса и найти: 1) изменение  $\Delta U$  внутренней энергии газа; 2) совершенную им работу  $L$ ; 3) количество теплоты  $Q$ , переданное газу.

*Решение.* Построим график процесса (рис. 11.1). На графике точками 1, 2, 3 обозначены состояния газа, характеризуемые параметрами  $(p_1, V_1, T_1)$ ,  $(p_1, V_2, T_2)$ ,  $(p_2, V_2, T_3)$ .

1. Изменение внутренней энергии газа при переходе его из состояния 1 в состояние 3 выражается формулой

$$\Delta U = c_v m \Delta T,$$

где  $c_v$  — удельная теплоемкость газа при постоянном объеме;  $m$  — масса газа;  $\Delta T$  — разность температур, соответствующих конечному 3 и начальному 1 состояниям, т. е.  $\Delta T = T_3 - T_1$ . Так как  $c_v = \frac{i}{2} \frac{R}{M}$ ;

где  $M$  — молярная масса газа, то

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R (T_3 - T_1). \quad (1)$$

Температуры  $T_1$  и  $T_3$  выразим из уравнения Менделеева — Клапейрона ( $pV = \frac{m}{M} RT$ ):

$$T_1 = \frac{Mp_1V_1}{mR}; \quad T_2 = \frac{Mp_2V_2}{mR}.$$

С учетом этого равенство (1) перепишем в виде

$$\Delta U = (i/2)(p_2V_2 - p_1V_1).$$

Подставим сюда значения величин (учтем, что для кислорода, как двухатомного газа,  $i=5$ ) и произведем вычисления:

$$\Delta U = 3,25 \text{ МДж}.$$

2. Полная работа, совершаемая газом, равна  $L = L_1 + L_2$ , где  $L_1$  — работа на участке 1—2;  $L_2$  — работа на участке 2—3,

На участке 1—2 давление постоянно ( $p = \text{const}$ ). Работа в этом случае выражается формулой  $L_1 = p_1 \Delta V = p_1(V_2 - V_1)$ . На участке 2—3 объем газа не изменяется и, следовательно, работа газа на этом участке равна нулю ( $L_2 = 0$ ). Таким образом,  $L = L_1 = p_1(V_2 - V_1)$ .

Подставив в эту формулу значения физических величин, произведем вычисления:

$$L = 0,4 \text{ МДж}$$

3. Согласно первому началу термодинамики, количество теплоты  $Q$ , переданное газу, равно сумме работы  $A$ , совершенной газом, и изменению  $\Delta U$  внутренней энергии:

$$Q = L + \Delta U, \text{ или } Q = 3,65 \text{ МДж}.$$

**Пример 8.** Идеальный двухатомный газ, содержащий количество вещества  $n=1$  моль, находится под давлением  $p_1=250 \text{ кПа}$  и занимает объем  $V_1=10 \text{ л}$ . Сначала газ изохорно нагревают до температуры  $T_2=400 \text{ К}$ . Далее, изотермически расширяя, доводят его до первоначального давления. После этого путем изобарного сжатия возвращают газ в начальное состояние. Определить термический КПД  $\eta$  цикла.

*Решение.* Для наглядности построим сначала график цикла, который состоит из изохоры, изотермы и изобары. В координатах  $p, V$  этот цикл имеет вид, представленный на рис. 11.2. Характерные точки цикла обозначим 1, 2, 3.

Термический КПД любого цикла определяется выражением

$$\eta = (Q_1 - Q_2)/Q_1, \text{ или } \eta = 1 - Q_2/Q_1, \quad (1) \text{ где } Q_1 \text{ — количество теплоты, полученное газом за цикл от нагревателя; } Q_2 \text{ — количество теплоты, отданное газом за цикл охладителю.}$$

Заметим, что разность количеств теплоты  $Q_1 - Q_2$  равна работе  $A$ , совершаемой газом за цикл. Эта работа на графике в координатах  $p, V$  (рис. 11.2) изображается площадью цикла (площадь цикла заштрихована).

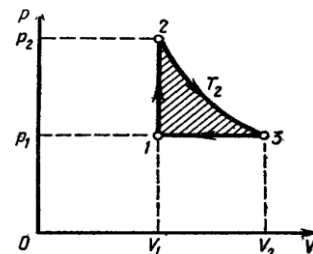


Рис. 11.2

Рабочее вещество (газ) получает количество теплоты  $Q_1$  на двух участках:  $Q_{1-2}$  на участке 1—2 (изохорный процесс) и  $Q_{2-3}$  на участке 2—3 (изотермический процесс). Таким образом,

$$Q_1 = Q_{1-2} + Q_{2-3}.$$

Количество теплоты, полученное газом при изохорном процессе, равно

$$Q_{1-2} = C_v n (T_2 - T_1),$$

где  $C_v$  — молярная теплоемкость газа при постоянном объеме;  $n$  — количество вещества. Температуру  $T_1$  начального состояния газа найдем, воспользовавшись уравнением Клапейрона — Менделеева:

$$T_1 = p_1 V_1 / (nR).$$

Подставив числовые значения и произведя вычисления, получим

$$T_1 = \frac{250 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3}}{1,8,31} \text{ К} = 300 \text{ К}$$

Количество теплоты, полученное газом при изотермическом процессе, равно

$$Q_{2-3} = nRT_2 \ln(V_2/V_1),$$

где  $V_2$  — объем, занимаемый газом при температуре  $T_2$  и давлении  $p_1$  (точка 3 на графике).

На участке 3—1 газ отдает количество теплоты  $Q_2$ , равное

$$Q_2 = Q_{3-1} = C_p \nu (T_2 - T_1), \text{ где } C_p \text{ — молярная теплоемкость газа при изобарном процессе.}$$

Подставим найденные значения  $Q_1$  и  $Q_2$  в формулу (1):

$$\eta = 1 - \frac{\nu C_p (T_2 - T_1)}{\nu C_v (T_2 - T_1) + \nu RT_2 \ln(V_2/V_1)}$$

В полученном выражении заменим отношение объемов  $V_2/V_1$ , согласно закону Гей-Люссака, отношением температур ( $V_2/V_1 = T_2/T_1$ ) и выразим  $C_v$  и  $C_p$  через число степеней свободы молекулы [ $C_v = iR/2$ ,  $C_p = (i+2)R/2$ ]. Тогда после сокращения на  $n$  и  $R/2$  получим

$$\eta = 1 - \frac{(i+2)(T_2 - T_1)}{iT_2 - T_1 + 2T_2 \ln(T_2/T_1)}.$$

Подставив значения  $i$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  и  $R$  и произведя вычисления, найдем

$$\eta = 1 - \frac{(5+2)(400-300)}{5(400-300) + 2 \cdot 400 \ln(400/300)} = 0,041 = 4,1\%$$

**Пример 9.** В цилиндре под поршнем находится водород массой  $m=0,02$  кг при температуре  $T_1=300$  К. Водород начал расширяться адиабатно, увеличив свой объем в пять раз, а затем был сжат изотермически, причем объем газа уменьшился в пять раз. Найти температуру  $T_2$ , в конце адиабатного расширения и работу  $L$ , совершенную газом. Изобразить процесс графически.

*Решение.* Температуры и объемы газа, совершающего адиабатный процесс, связаны между собой соотношением

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1},$$

где  $k$  — показатель адиабаты (для водорода как двухатомного газа  $k=1,4$ ).

Отсюда получаем выражение для конечной температуры  $T_2$ :

$$T_2 = T_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1}.$$

Подставляя числовые значения заданных величин, находим

$$T_2 = 300 \left( \frac{1}{5} \right)^{1,4-1} \text{ К} = 300 \left( \frac{1}{5} \right)^{0,4} \text{ К}.$$

Прологарифмируем обе части полученного выражения:

$$\lg T_2 = \lg 300 + 0,4(\lg 1 - \lg 5) = 2,477 + 0,4(-0,699) = 2,477 - 0,280 = 2,197.$$

Зная  $\lg T_2$ , по таблицам антилогарифмов находим искомое значение  $T_2$ :  
 $T_2 = 157 \text{ К}$ .

Работа  $L_1$  газа при адиабатном расширении определяется по формуле  

$$L_1 = \frac{m}{M} c_v (T_1 - T_2) = \frac{m}{M} \frac{i}{2} R (T_1 - T_2).$$

Подставив сюда числовые значения величин, после вычисления получим  

$$L_1 = \frac{0,02}{2} \cdot 5 \cdot 8,31 (300 - 157) \text{ Дж} = 29,8 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 29,8 \text{ кДж}$$

Работа  $L_2$  газа при изотермическом сжатии выражается формулой  

$$L_2 = RT_2 (m/M) \ln(V_2/V_1).$$

Произведя вычисления по этой формуле, найдем  
 $L_2 = -21 \text{ кДж}$ .

Знак минус показывает, что при сжатии газа работа совершена внешними силами.

Общая работа, совершенная газом при рассмотренных процессах,  $L = L_1 + L_2 = 29,8 \text{ кДж} + (-21 \text{ кДж}) = 8,8 \text{ кДж}$ .  
 График процесса приведен на рис. 11.3.

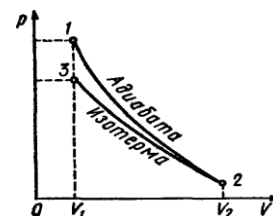


Рис. 11.3

**Пример 10.** Нагреватель тепловой машины, работающей по обратимому циклу Карно, имеет температуру  $t_1 = 200^\circ \text{С}$ . Определить температуру  $T_2$ , охладителя, если при получении от нагревателя количества теплоты  $Q_1 = 1 \text{ Дж}$  машина совершает работу  $L = 0,4 \text{ Дж}$ ? Потери на трение и теплоотдачу не учитывать.

*Решение.* Температуру охладителя найдем, используя выражение для термического КПД машины, работающей по циклу Карно,  $\eta = (T_1 - T_2)/T_1$ . Отсюда  

$$T_2 = T_1(1 - \eta). \quad (1)$$

Термический КПД тепловой машины выражает отношение количества теплоты, которое превращено в механическую работу  $L$ , к количеству теплоты  $Q_1$ , которое получено рабочим телом тепловой машины из внешней среды (от нагревателя), т. е.  $\eta = L/Q_1$ . Подставив это выражение в формулу (1), найдем  

$$T_2 = T_1(1 - L/Q). \quad (2)$$

Учтя, что  $T_1 = 473 \text{ К}$ , после вычисления по формуле (2) получим  $T_2 = 284 \text{ К}$ .

**Пример 11.** Найти изменение  $\Delta S$  энтропии при нагревании воды массой  $m = 100 \text{ г}$  от температуры  $t_1 = 0^\circ \text{С}$  до температуры  $t_2 = 100^\circ \text{С}$  и последующем превращении воды в пар той же температуры.

*Решение.* Найдем отдельно изменение энтропии  $\Delta S'$  при нагревании воды и изменение энтропии  $\Delta S''$  при превращении ее в пар. Полное изменение энтропии выразится суммой  $\Delta S'$  и  $\Delta S''$ .

Как известно, изменение энтропии выражается общей формулой

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} \quad (1)$$

При бесконечно малом изменении  $dT$  температуры нагреваемого тела затрачивается количество теплоты  $dQ = mcdT$ , где  $m$  — масса тела;  $c$  — его удельная теплоемкость. Подставив выражение  $dQ$  в равенство (1), найдем формулу для вычисления изменения энтропии при нагревании воды:

$$\Delta S' = \int_{T_1}^{T_2} \frac{mcdT}{T}.$$

Вынесем за знак интеграла постоянные величины и произведем интегрирование, тогда получим

$$\Delta S' = mc \ln(T_2/T_1).$$

После вычислений найдем  $\Delta S' = 132$  Дж/К.

При вычислении по формуле (1) изменения энтропии во время превращения воды в пар той же температуры постоянная температура  $T'$  выносится за знак интеграла. Вычислив интеграл, найдем

$$\Delta S'' = \frac{1}{T} \int_1^2 dQ = \frac{Q}{T} \quad (2)$$

где  $Q$  — количество теплоты, переданное при превращении нагретой воды в пар той же температуры.

Подставив в равенство (2) выражение количества теплоты  $Q = \lambda m$ , где  $\lambda$  — удельная теплота парообразования, получим

$$\Delta S'' = \frac{\lambda m}{T} \quad (3)$$

Произведя вычисления по формуле (3), найдем

$$\Delta S'' = 605 \text{ Дж/К.}$$

Полное изменение энтропии при нагревании воды и последующем превращении ее в пар  $\Delta S = \Delta S' + \Delta S'' = 737$  Дж/К.

**Пример 12.** Определить изменение  $\Delta S$  энтропии при изотермическом расширении кислорода массой  $m = 10$  г от объема  $V_1 = 25$  л до объема  $V_2 = 100$  л.

*Решение.* Так как процесс изотермический, то в общем выражении энтропии

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} \quad \text{температуру выносят за знак интеграла. Выполнив это, получим}$$

$$\Delta S = \frac{1}{T} \int_1^2 dQ = \frac{Q}{T} \quad (1)$$

Количество теплоты  $Q$ , полученное газом, найдем по первому началу термодинамики:

$Q = \Delta U + L$ . Для изотермического процесса  $\Delta U = 0$ , следовательно,

$Q = L$ , (2) а работа  $L$  для этого процесса определяется по формуле

$$L = (m/M)RT \ln(V_2/V_1). \quad (3)$$

С учетом (2) и (3) равенство (1) примет вид

$$\Delta S = (m/M)R \ln(V_2/V_1). \quad (4)$$

Подставив в (4) числовые значения и произведя вычисления, получим

$$\Delta S = (10 \cdot 10^{-3} / (32 \cdot 10^{-3})) \cdot 8,31 \ln(100 \cdot 10^{-3} / (25 \cdot 10^{-3})) \text{ Дж/К} = 3,60 \text{ Дж/К.}$$

**Пример 13.** В баллоне при постоянном давлении  $p_1 = 5$  МПа находится кислород, поступающий из баллона через суживающееся сопло в среду давлением  $p_0 = 4$  МПа. Найти скорости истечения и массовый расход кислорода, если площадь истечения выходного сопла  $S_2 = 20$  мм<sup>2</sup>. Начальная температура кислорода  $t_1 = 100$  °С. Начальная скорость истечения  $c_1 = 0$ .

*Решение.* Отношение  $p_0/p_1 = 4/5 = 0,8$ , поэтому режим истечения докритический.

Предварительно определим начальный удельный объем кислорода из уравнения состояния:

$$v_1 = RT_1/p_1 = 259,8 (100 + 273) / (5 \cdot 10^6) \approx 0,02 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Скорость истечения:



$$c_2 = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} = \sqrt{2 \frac{1,4}{1,4-1} 5 \cdot 10^6 \cdot 0,02 \left[ 1 - 0,8^{\frac{1,4-1}{1,4}} \right]} = 212 \text{ м/с.}$$

Массовый расход:

$$\begin{aligned} \dot{m} &= S_2 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{p_1}{v_1} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} = \\ &= 20 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{2 \cdot 1,4}{1,4-1} \cdot \frac{5 \cdot 10^6}{0,02} \left[ 0,8^{\frac{2}{1,4}} - 0,8^{\frac{1,4+1}{1,4}} \right]} = 0,18 \text{ кг/с.} \end{aligned}$$

**Пример 14.** Объемная подача идеального воздушного компрессора составляет  $0,2 \text{ м}^3/\text{с}$  при температуре всасывания  $27^\circ\text{C}$  и давлении  $0,1 \text{ МПа}$ . Давление сжатого воздуха  $0,8 \text{ МПа}$ . Найти температуру воздуха и объемную подачу компрессора (по конечным параметрам воздуха) в конце сжатия и мощность, затрачиваемую на получение сжатого воздуха, в трех вариантах: при сжатии по изотерме, по адиабате ( $k = 1,4$ ) и по политропе ( $n = 1,2$ ).

*Решение.* Первый вариант – изотермическое сжатие.

$$T_2 = T_1 = 27 + 273 = 300 \text{ К.}$$

Объемная подача компрессора по конечным параметрам

$$V_{t2} = V_{t1} (p_1 / p_2) = 0,2 \cdot (0,1/0,8) = 0,025 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Мощность при изотермическом сжатии определяется по уравнению

$$N_{к из} = p_1 V_{t1} \ln(p_2 / p_1) = 0,1 \cdot 10^6 \cdot 0,2 \ln(0,1/0,8) = 41,5 \text{ кВт.}$$

Второй вариант – адиабатное сжатие.

Конечная температура воздуха

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} = 300 \cdot \left( \frac{0,8}{0,1} \right)^{1,4/(1,4-1)} = 544 \text{ К.}$$

Объемная подача компрессора по конечным параметрам

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 (p_1 / p_2)^{1/k} = 0,2 \cdot (0,1/0,8)^{1/1,4} = 0,045 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Мощность при адиабатном сжатии определяется по уравнению

$$N_{к ад} = \frac{k}{k-1} p_1 \dot{V}_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = \frac{1,4}{1,4-1} 0,1 \cdot 10^6 \cdot 0,2 \left[ \left( \frac{0,8}{0,1} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right] = 56,7 \text{ кВт.}$$

Третий вариант – политропное сжатие.

Конечная температура воздуха

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} = 300 \cdot \left( \frac{0,8}{0,1} \right)^{1,2/(1,2-1)} = 368 \text{ К.}$$

Объемная подача компрессора по конечным параметрам

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 (p_1 / p_2)^{1/n} = 0,2 \cdot (0,1/0,8)^{1/1,2} = 0,033 \text{ м}^3/\text{с}.$$

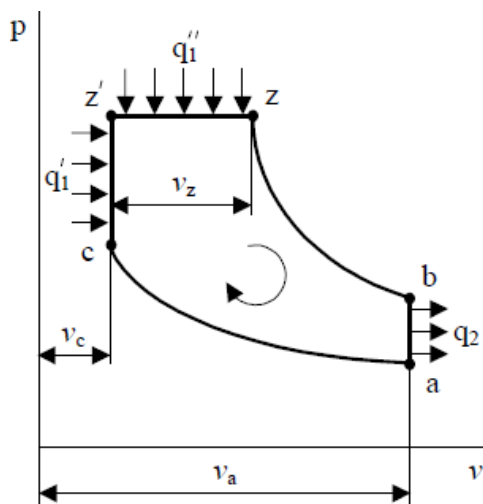
Мощность при политропном сжатии определяется по уравнению

$$N_{\kappa \text{ пол}} = \frac{n}{n-1} p_1 \dot{V}_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right] = \frac{1,2}{1,2-1} 0,1 \cdot 10^6 0,2 \left[ \left( \frac{0,8}{0,1} \right)^{(1,2-1)/1,2} - 1 \right] = 49,8 \text{ кВт}.$$

**Пример 15.** Исследовать термодинамический цикл ДВС со смешанным подводом теплоты со следующими данными:  $p_a = 0,1 \text{ МПа}$ ;  $t_a = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $c_v = 0,72 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $q_1' + q_1'' = 1340 \text{ кДж}/\text{кг}$ ;  $k = 1,4$ ;  $p_z = 5,5 \text{ МПа}$ ;  $\varepsilon = 15$ .

Рабочее тело – воздух, рассматриваемый как идеальный газ. Масса воздуха 1 кг.

*Решение.* Находим параметры в характерных точках цикла.



В точке  $a$  – начале сжатия  $v_a = RT_a/p_a$ ; для воздуха  $R = 287,1 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ , поэтому  $v_a = 287,1 \cdot 300 / (0,1 \cdot 10^6) = 0,861 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

В точке  $c$  – конце сжатия получим

$$v_c = v_a / \varepsilon = 0,861 / 15 = 0,0573 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$p_c = p_a (v_a / v_c)^k = p_a \varepsilon^k = 0,1 \cdot 15^{1,4} = 4,43 \text{ МПа};$$

$$T_c = p_c v_c / R = 4,43 \cdot 10^6 \cdot 0,0573 / 287,1 = 883 \text{ К или } t_c = 610 \text{ }^\circ\text{C}.$$

В точке  $z'$  – конце подвода теплоты при постоянном объёме воспользуемся уравнением

$$\lambda = \frac{p_z}{p_c} = \frac{5,5}{4,43} = 1,242;$$

$$T_{z'} = T_c \lambda = 883 \cdot 1,242 = 1097 \text{ К или } t_{z'} = 824 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$v_{z'} = v_c = 0,0573 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

В точке  $z$  – конце подвода теплоты при постоянном давлении – предварительно вычислим  $q_1''$ ; так как  $q_1' + q_2'' = 1340 \text{ кДж}/\text{кг}$ , то сначала подсчитаем  $q_1'$ :

$$q_1' = c_v (T_z - T_c) = 0,72 \cdot 10^3 (1097 - 883) = 154 \text{ кДж}/\text{кг},$$

поэтому  $q_1'' = 1340 - 154 = 1186 \text{ кДж}/\text{кг}$

Температуру  $T_z$  определим из уравнения  $q_1'' = c_p(T_z - T_z')$ . Предварительно определим удельную теплоемкость при постоянном давлении  $c_p$ :  $c_p = k c_v = 1,4 \cdot 0,72 = 1,01$  кДж/(кг·К).

Тогда  $T_z = q_1''/c_p + T_z' = 1186,01 + 1097 = 2274$  К или  $t_z = 2001$  °С.

Находим  $v_z$ . Сначала подсчитаем степень предварительного расширения:  $\rho = T_z/T_z' = 2274/1097 = 2,07$ .

Теперь вычислим  $v_z = \rho v_c = 2,07 \cdot 0,0573 = 0,118$  м³/кг.

В точке  $b$  – в конце адиабатного расширения –  $v_b = v_a = 0,861$  м³/кг.

Найдем  $T_b$ :  $T_b = T_a \rho^{k\lambda} = 300 \cdot 2,07^{1,4} \cdot 1,242 = 1034$  К или  $t_b = 761$  °С.

Давление  $p_b$  находим из уравнения состояния для точки  $b$ :

$p_b = RT_b/v_b = 287,1 \cdot 1034/0,861 = 0,345$  МПа.

Определим термический КПД цикла по формуле

$$\eta_t = 1 - \frac{\lambda \rho^k - 1}{\varepsilon^{k-1} (\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1))} = 1 - \frac{1,242 \cdot 2,07^{1,4} - 1}{15^{1,4-1} (1,242 - 1 + 1,4 \cdot 1,242(2,07 - 1))} = 0,605 \text{ (60,5 \%)}.$$

*Проверка.*

Удельная работа цикла :

$l_0 = l_{z'-z} + l_{z-b} + l_{a-c}$ ;

$l_{z'-z} = R(T_z - T_z') = 287,1(2274 - 1097) = 337,9$  кДж/(кг·К);

$l_{z-b} = R(T_z - T_b)/(k - 1) = 287,1(2274 - 1034)/(1,4 - 1) = 890$  кДж/(кг·К);

$l_{a-c} = R(T_a - T_c)/(k - 1) = 287,1(300 - 883)/(1,4 - 1) = -418$  кДж/(кг·К).

Удельная работа цикла

$l_0 = 337,9 + 890 - 418 = 809,9$  кДж/(кг·К).

Термический КПД цикла

$$\eta_t = l_0/q_1 = \frac{l_0}{q_1' + q_1''} = \frac{809}{1340} = 0,604 \text{ (60,4 \%)}.$$

### Задания контрольной работы

Номер варианта	Номера задач						
1	1	11	21	31	41	51	61
2	2	12	22	32	42	52	62
3	3	13	23	33	43	53	63
4	4	14	24	34	44	54	64
5	5	15	25	35	45	55	65
6	6	16	26	36	46	56	61
7	7	17	27	37	47	57	62
8	8	18	28	38	48	58	63
9	9	19	29	39	49	59	64
10	10	20	30	40	50	60	65
11	23	33	11	1	29	57	63
12	24	14	2	33	43	51	60
13	5	15	25	35	41	54	64
14	6	16	26	38	42	53	61

1. Какова плотность воздуха в камере сгорания дизельного двигателя при температуре  $503^{\circ}\text{C}$ , если давление воздуха равно  $400\text{ кПа}$ ? Молярная масса воздуха  $29 \cdot 10^{-3}\text{ кг/моль}$ .
2. Газ занимает объём  $4\text{ л}$  при температуре  $7^{\circ}\text{C}$ . Масса газа  $12\text{ г}$ . После нагревания газа при постоянном давлении его плотность стала равной  $0,6\text{ кг/м}^3$ . До какой температуры нагрели газ?
3. При изотермическом сжатии газа от объёма  $15\text{ л}$  до объёма  $5\text{ литров}$  давление возросло на  $2,4 \cdot 10^4\text{ Па}$ . Найти первоначальное давление.
4. Сосуд, содержащий газ под давлением  $1,4 \cdot 10^5\text{ Па}$ , соединили с пустым сосудом объёмом  $6\text{ л}$ , после чего в обоих сосудах установилось давление  $10^5\text{ Па}$ . Определить объём первого сосуда, если температура газа не изменилась.
5. В сосуде вместимостью  $V=5\text{ л}$  находится однородный газ количеством вещества  $\nu=0,2\text{ моль}$ . Определить, какой это газ, если его плотность  $\rho=1,12\text{ кг/м}^3$ .
6. При нагревании идеального газа на  $\Delta T=1\text{ К}$  при постоянном давлении объём его увеличился на  $1/350$  первоначального объёма. Найти начальную температуру  $T$  газа.
7. В баллоне вместимостью  $V=25\text{ л}$  находится водород при температуре  $T=290\text{ К}$ . После того как часть водорода израсходовали, давление в баллоне понизилось на  $\Delta p=0,4\text{ МПа}$ . Определить массу  $m$  израсходованного водорода.
8. В баллоне находится сжатый газ. Когда часть газа израсходовали, давление в баллоне уменьшилось в  $4$  раза, абсолютная температура понизилась на  $25\%$ . Во сколько раз уменьшилась масса газа в баллоне?
9. Баллон содержит газ при температуре  $27^{\circ}\text{C}$  и некотором давлении. Какую долю первоначального составит давление в баллоне, если выпустить из него половину массы газа, а температуру газа понизить до  $0^{\circ}\text{C}$ ?
10. В цилиндре двигателя внутреннего сгорания перед сжатием температура воздуха равна  $47^{\circ}\text{C}$ . Найти температуру воздуха при наибольшем сжатии, если его объём

уменьшается в 16 раз, а давление возрастает в 46 раз.

11. Какой объем  $V$  занимает смесь газов — азота массой  $m_1=1$  кг и гелия массой  $m_2=1$  кг при нормальных условиях? Определить молярную массу и удельную газовую постоянную смеси.

12. В баллонах вместимостью  $V_1=20$  л и  $V_2=44$  л содержится газ. Давление в первом баллоне  $p_1=2,4$  МПа, во втором —  $p_2=1,6$  МПа. Определить общее давление  $p$  и парциальные  $p'_1$  и  $p'_2$  после соединения баллонов, если температура газа осталась прежней.
13. В сосуде вместимостью  $V=0,01$  м<sup>3</sup> содержится смесь газов — азота массой  $m_1=7$  г и водорода массой  $m_2=1$  г — при температуре  $T=280$  К. Определить давление  $p$  смеси газов. Определить молярную массу и удельную газовую постоянную смеси.
14. Найти плотность  $\rho$  газовой смеси водорода и кислорода, если их массовые доли  $\omega_1$  и  $\omega_2$  равны соответственно  $1/9$  и  $8/9$ . Давление  $p$  смеси равно  $100$  кПа, температура  $T=300$  К. Определить молярную массу и удельную газовую постоянную смеси.
15. Газовая смесь, состоящая из кислорода и азота, находится в баллоне под давлением  $p=1$  МПа. Определить парциальные давления  $p_1$  кислорода и  $p_2$  азота, если массовая доля  $\omega_1$  кислорода в смеси равна  $0,2$ . Определить молярную массу и удельную газовую постоянную смеси.
16. Сухой воздух состоит в основном из кислорода и азота. Если пренебречь остальными составными частями воздуха, то можно считать, что массовые доли кислорода и азота соответственно  $\omega_1=0,232$ ,  $\omega_2=0,768$ . Определить молярную массу и удельную газовую постоянную воздуха.
17. Баллон вместимостью  $V=30$  л содержит смесь водорода и гелия при температуре  $T=300$  К и давлении  $p=828$  кПа. Масса  $m$  смеси равна  $24$  г. Определить массу  $m_1$  водорода и массу  $m_2$  гелия. Определить молярную массу и удельную газовую постоянную смеси.
18. В сосуде вместимостью  $V=15$  л находится смесь азота и водорода при температуре  $t=23^\circ\text{C}$  и давлении  $p=200$  кПа. Определить массы смеси и ее компонентов, если массовая доля  $\omega_1$  азота в смеси равна  $0,7$ . Определить молярную массу и удельную газовую постоянную смеси.
19. Баллон вместимостью  $V=5$  л содержит смесь гелия и водорода при давлении  $p=600$  кПа. Масса  $m$  смеси равна  $4$  г, массовая доля  $\omega_1$  гелия равна  $0,6$ . Определить температуру  $T$  смеси. Определить молярную массу и удельную газовую постоянную смеси.
20. В сосуде находится смесь кислорода и водорода. Масса  $m$  смеси равна  $3,6$  г. Массовая доля  $\omega_1$  кислорода составляет  $0,6$ . Определить количество вещества  $n$  смеси, молярную массу и удельную газовую постоянную смеси.
21. Кислород массой  $m=2$  кг занимает объем  $V_1=1$  м<sup>3</sup> и находится под давлением  $p_1=0,2$  МПа. Газ был нагрет сначала при постоянном давлении до объема  $V_2=3$  м<sup>3</sup>, а затем при постоянном объеме до давления  $p_2=0,5$  МПа. Найти: 1) изменение внутренней энергии  $\Delta U$  газа; 2) совершенную им работу  $L$ ; 3) количество теплоты  $Q$ , переданное газу.
22. Какая доля  $\omega_1$  количества теплоты  $Q$ , подводимого к идеальному газу при изобарном процессе, расходуется на увеличение  $\Delta U$  внутренней энергии газа и какая доля  $\omega_2$  — на работу  $L$  расширения? Рассмотреть три случая, если газ: 1) одноатомный; 2) двухатомный; 3) трехатомный.
23. Азот массой  $m=200$  г расширяется изотермически при температуре  $T=280$  К, причем объем газа увеличивается в два раза. Найти: 1) изменение  $\Delta U$  внутренней энергии газа; 2) совершенную при расширении газа работу  $L$ ; 3) количество теплоты  $Q$ , полученное газом.
24. В цилиндре под поршнем находится азот массой  $m=0,6$  кг, занимающий объем  $V_1=1,2$  м<sup>3</sup> при температуре  $T=560$  К. В результате подвода теплоты газ расширился

и занял объем  $V_2=4,2 \text{ м}^3$ , причем температура осталась неизменной. Найти: 1) изменение  $\Delta U$  внутренней энергии газа; 2) совершенную им работу  $L$ ; 3) количество теплоты  $Q$ , сообщенное газу.

25. При изотермическом расширении водорода массой  $m=1 \text{ г}$ , имевшего температуру  $T=280 \text{ К}$ , объем газа увеличился в три раза. Определить работу  $L$  расширения газа и полученное газом количество теплоты  $Q$ .

26. Расширяясь, водород совершил работу  $L=6 \text{ кДж}$ . Определить количество теплоты  $Q$ , подведенное к газу, если процесс протекал: 1) изобарно; 2) изотермически.

27. Автомобильная шина накачена до давления  $p_1=220 \text{ кПа}$  при температуре  $T_1=290 \text{ К}$ . Во время движения она нагрелась до температуры  $T_2=330 \text{ К}$  и лопнула. Считая процесс, происходящий после повреждения шины, адиабатным, определить изменение температуры  $\Delta T$  вышедшего из нее воздуха. Внешнее давление  $p_0$  воздуха равно  $100 \text{ кПа}$ .

28. При адиабатном расширении кислорода с начальной температурой  $T_1=320 \text{ К}$  внутренняя энергия уменьшилась на  $\Delta U=8,4 \text{ кДж}$ , а его объем увеличился в  $n=10$  раз. Определить массу кислорода.

29. В цилиндре под поршнем находится водород массой  $m=0,02 \text{ кг}$  при температуре  $T_1=300 \text{ К}$ . Водород сначала расширился адиабатно, увеличив свой объем в пять раз, а затем был сжат изотермически, причем объем газа уменьшился в пять раз. Найти температуру  $T_2$  в конце адиабатного расширения и полную работу  $L$ , совершенную газом.

30. При адиабатном сжатии кислорода массой  $m=20 \text{ г}$  его внутренняя энергия увеличилась на  $\Delta U=8 \text{ кДж}$  и температура повысилась до  $T_2=900 \text{ К}$ . Найти: 1) повышение температуры  $\Delta T$ , 2) конечное давление газа  $p_2$ , если начальное давление  $p_1=200 \text{ кПа}$ .

31. Идеальный двухатомный газ, содержащий количество вещества  $m=1 \text{ моль}$ , совершает цикл, состоящий из двух изохор и двух изобар. Наименьший объем  $V_{\min}=10 \text{ л}$ , наибольший  $V_{\max}=20 \text{ л}$ , наименьшее давление  $p_{\min}=246 \text{ кПа}$ , наибольшее  $p_{\max}=410 \text{ кПа}$ . Построить график цикла. Определить температуру  $T$  газа для характерных точек цикла и его термический КПД  $\eta$ .

32. Идеальный двухатомный газ, содержащий количество вещества  $n=1 \text{ кмоль}$ , совершает замкнутый цикл, график которого изображен на рис. 11.4. Определить: 1) количество теплоты  $Q_1$ , полученное от нагревателя; 2) количество теплоты  $Q_2$ , переданное охладителю; 3) работу  $L$ , совершаемую газом за цикл; 4) термический КПД  $\eta$  цикла.

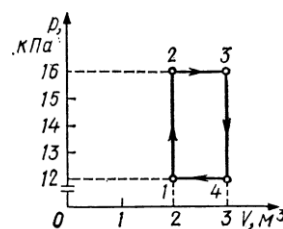


Рис. 11.4

33. Идеальный двухатомный газ, содержащий количество вещества  $n=1 \text{ моль}$  и находящийся под давлением  $p_1=0,1 \text{ МПа}$  при температуре  $T_1=300 \text{ К}$ , нагревают при постоянном объеме до давления  $p_2=0,2 \text{ МПа}$ . После этого газ изотермически расширился до начального давления и затем изобарно был сжат до начального объема  $V_1$ . Построить график цикла. Определить температуру  $T$  газа для характерных точек цикла и его термический КПД  $\eta$ .

34. Одноатомный газ, содержащий количество вещества  $n=0,1 \text{ кмоль}$ , под давлением  $p_1=100 \text{ кПа}$  занимал объем  $V_1=5 \text{ м}^3$ . Газ сжимался изобарно до объема  $V_2=1 \text{ м}^3$ , затем сжимался адиабатно и расширялся при постоянной температуре до начальных объема и давления. Построить график процесса. Найти: 1) количество теплоты  $Q_1$ , полученное газом от нагревателя; 2) количество теплоты  $Q_2$ , переданное газом охладителю; 3) работу  $L$ , совершенную газом за весь цикл; 4) термический КПД  $\eta$  цикла.

35. Идеальный многоатомный газ совершает цикл, состоящий из двух изохор и двух изобар, причем наибольшее давление газа в два раза больше наименьшего, а наибольший объем в четыре раза больше наименьшего. Определить термический КПД  $\eta$  цикла.

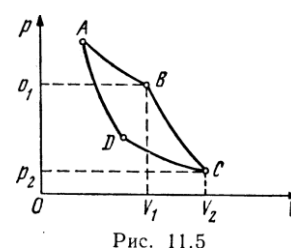
36. Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура  $T_2$  охладителя равна 290 К. Во сколько раз увеличится КПД цикла, если температура нагревателя повысится от  $T'_1=400$  К до  $T''_2=600$  К?

37. Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура  $T_1$  нагревателя равна 470 К, температура  $T_2$  охладителя равна 280 К. При изотермическом расширении газ совершает работу  $A=100$  Дж. Определить термический КПД  $\eta$  цикла, а также количество теплоты  $Q_2$ , которое газ отдает охладителю при изотермическом сжатии.

38. Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура  $T_1$  нагревателя в четыре раза выше температуры  $T_2$  охладителя. Какую долю  $\omega$  количества теплоты, получаемого за один цикл от нагревателя, газ отдает охладителю?

39. Идеальный газ совершает цикл Карно. Работа  $L_1$  изотермического расширения газа равна 5 Дж. Определить работу  $L_2$  изотермического сжатия, если термический КПД  $\eta$  цикла равен 0,2.

40. Идеальный двухатомный газ совершает цикл Карно, график которого изображен на рис. 11.5. Объемы газа в состояниях В и С соответственно  $V_1=12$  л и  $V_2=16$  л. Найти термический КПД  $\eta$  цикла.



41. В баллоне с воздухом поддерживается постоянное давление 0,5 МПа и температура 17 °С. Воздух вытекает через суживающееся сопло в среду с давлением 0,1 МПа. Найти внутренний диаметр выходного сечения сопла, если массовый расход воздуха при истечении 500 кг/ч.

42. Найти скорость истечения воздуха из суживающегося сопла и массовый расход, если  $p_1=2,4$  МПа,  $t_1=20$  °С,  $p_2=0,1$  МПа. Площадь выходного сечения сопла 10 см<sup>2</sup>

43. Из сопла Лаваля происходит истечение воздуха с давлением 1,5 МПа и температурой -27 °С в среду с давлением 0,12 МПа. Диаметр узкой части сопла 40 мм. Через некоторое время через сопло прошло 400 кг воздуха. Найти время истечения и скорость выхода из сопла  $c_2$ .

44. Через сопло Лаваля происходит истечение воздуха в наружную среду с давлением 0,11 МПа. Во входном сечении сопла давление воздуха 0,8 МПа при температуре 20 °С. Найти конечную скорость истечения воздуха, а также давление и скорость в узкой части сопла.

45. Найти скорость истечения и массовый расход перегретого пара давлением 2 МПа и температурой 350 °С, вытекающего через суживающееся сопло в среду с давлением 1,5 МПа. выходное сечение сопла 0,001 м<sup>2</sup>.

46. Найти скорость истечения в наименьшем сечении сопла Лаваля и при выходе из него, если известно, что в начальном состоянии давление пара 1,6 МПа и температура 200 °С, а давление наружной среды 0,1 МПа.

47. Найти массовый расход пара через сопло Лаваля, если наименьший диаметр сопла 50 мм, давление перед соплом 1 МПа, а давление окружающей среды 0,2 МПа. Температура пара перед соплом 220 °С.

48. Из сопла Лаваля происходит истечение воздуха с давлением 1,5 МПа и температурой -27 °С в среду с давлением 0,12 МПа. Диаметр узкой части сопла 40 мм.



Через некоторое время через сопло прошло 400 кг воздуха. Найти время истечения и скорость выхода из сопла  $c_2$ .

49. Найти скорость истечения и массовый расход перегретого пара давлением 2 МПа и температурой 350 °С, вытекающего через суживающееся сопло в среду с давлением 1,5 МПа. Выходное сечение сопла 0,001 м<sup>2</sup>.

50. В баллоне с воздухом поддерживается постоянное давление 0,5 МПа и температура 17 °С. Воздух вытекает через суживающееся сопло в среду с давлением 0,1 МПа. Найти внутренний диаметр выходного сечения сопла, если массовый расход воздуха при истечении 500 кг/ч.

51. Одноступенчатый компрессор, имеющий подачу 100 м<sup>3</sup>/ч, подает охлажденный до начальной температуры сжатый воздух давлением 0,5 МПа. Наружное давление 0,1 МПа при температуре 27 °С. Найти подводимую теоретическую мощность при изотермическом сжатии.

52. Одноступенчатый компрессор, имеющий подачу 100 м<sup>3</sup>/ч, подает охлажденный до начальной температуры сжатый воздух давлением 0,5 МПа. Наружное давление 0,1 МПа при температуре 27 °С. Найти подводимую теоретическую мощность при политропном сжатии ( $n = 1,25$ ).

53. Одноступенчатый компрессор, имеющий подачу 100 м<sup>3</sup>/ч, подает охлажденный до начальной температуры сжатый воздух давлением 0,5 МПа. Наружное давление 0,1 МПа при температуре 27 °С. Найти подводимую теоретическую мощность при адиабатном сжатии ( $k = 1,4$ ).

54. Одноступенчатый компрессор всасывает воздух объемом 500 м<sup>3</sup>/ч, давлением 0,1 МПа и температурой 17 °С. В компрессоре воздух изотермически сжимается до давления 0,9 МПа. Определить объем цилиндра компрессора и теоретическую подводимую к нему мощность, если частота вращения вала компрессора 100 мин<sup>-1</sup>.

55. Воздушный одноступенчатый компрессор всасывает воздух объемом 500 м<sup>3</sup>/ч, давлением 0,1 МПа и температурой 17 °С. Поступивший в цилиндр воздух адиабатно сжимается до давления 0,9 МПа. Найти конечную температуру сжатия, объем цилиндра и подводимую теоретическую мощность, если частота вращения вала компрессора 100 мин<sup>-1</sup>.

56. Одноступенчатый компрессор подает воздух массой 500 кг/ч, охлажденный до начальной температуры и сжатый до 0,8 МПа. Давление в цилиндре компрессора в начале сжатия 93 кПа при температуре 27 °С. Сжатие происходит по политропе с  $n = 1,3$ . В результате улучшения охлаждения стенок цилиндра компрессора показатель политропы сжатия понизился до 1,2. Найти экономию в подводимой мощности, полученную в результате улучшения охлаждения стенок цилиндра.

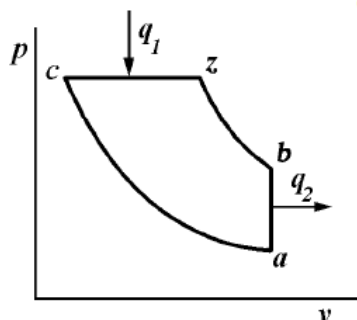
57. Одноступенчатый компрессор всасывает 250 м<sup>3</sup>/ч воздуха давлением 90 кПа при температуре 25 °С и сжимает его до 0,8 МПа. Каков должен быть расход воды, пропускаемой через рубашку компрессора за 1 ч, если сжатие происходит по политропе с показателем  $n = 1,2$ , а температура воды в рубашке компрессора повышается на 15 К.

58. Для получения воздуха давлением 3,6 МПа применяется двухступенчатый компрессор с промежуточным охлаждением воздуха в холодильнике до начальной температуры. Найти теоретическую подводимую мощность, если в начале сжатия давление воздуха 0,1 МПа, а показатель политропы сжатия для обеих ступеней  $n = 1,3$ .

59. Трехступенчатый компрессор всасывает воздух объемом 60 м<sup>3</sup>/ч, давлением 80 кПа при температуре 27 °С и сжимает его адиабатно до 10 МПа. Найти объемную подачу компрессора по сжатому воздуху и теоретическую мощность компрессора  $N_t$ .

60. Расход газа в поршневом одноступенчатом компрессоре составляет  $V_{t1} = 60$  м<sup>3</sup>/мин при давлении  $p_1 = 0,1$  МПа и температуре  $t_1 = 25$  °С. При сжатии газа температура повышается на  $200$  °С. Сжатие происходит по политропе с показателем  $n = 1,45$ . Определить конечное давление, работу сжатия, а также теоретическую мощность привода компрессора. При расчете принять  $k = 1,67$ .

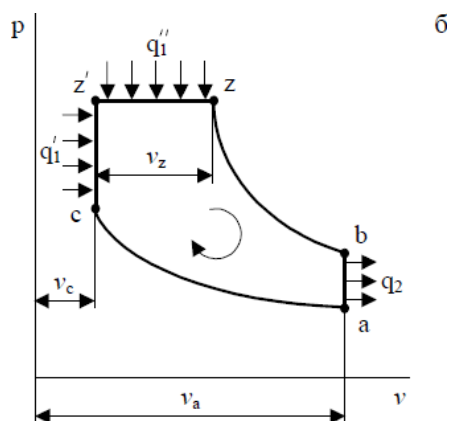
61. Газовая турбина работает по циклу с изобарным подводом теплоты. Определить параметры в характерных точках цикла, а также термический КПД цикла с полной регенерацией, если заданы следующие параметры и характеристики:  $p_a = 0,8$  МПа,  $t_a = -10$  °С, степень повышения давления  $\lambda = 5$ , степень предварительного расширения  $\rho = 3$ . Рабочее тело – азот. Удельную теплоёмкость считать постоянной.



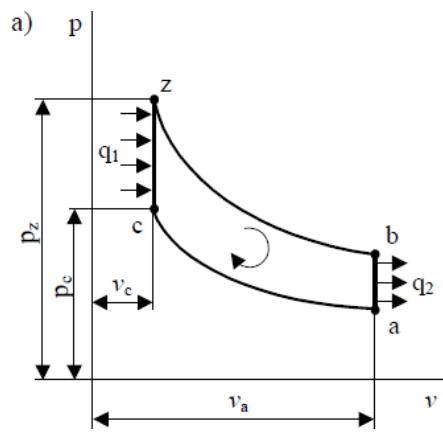
62. Температура воздуха перед входом в турбину  $950$  °С. Начальное давление воздуха  $p_a = 0,1$  МПа, степень повышения давления  $\lambda = 7$ ; степень предварительного расширения  $\rho = 2,2$ . Рассчитать цикл ГТУ с изобарным подводом теплоты без регенерации.

63. ГТУ работает по циклу с изобарным подводом теплоты при  $\lambda = 7$  и  $\rho = 2,8$ . Начальное состояние воздуха характеризуется давлением  $p_a = 0,8$  МПа и температурой  $t_a = -12$  °С. Процессы сжатия и расширения осуществляются по адиабате. Рассчитать цикл.

64. Известны следующие параметры цикла ДВС со смешанным подводом теплоты и его характеристики:  $p_a = 0,1$  МПа,  $t_a = 30$  °С, степень сжатия  $\varepsilon = 7$ , степень повышения давления  $\lambda = 2,0$ , степень предварительного расширения  $\rho = 1,2$ , рабочее тело – воздух. Найти параметры воздуха в характерных точках диаграммы цикла, количество подведённой теплоты, удельную работу цикла и его термический КПД.



65. Исследовать цикл ДВС с изохорным подводом теплоты, совершаемый воздухом массой  $1$  кг, если дано:  $p_a = 0,1$  МПа;  $t_a = 27$  °С;  $\varepsilon = 5,5$ ;  $\lambda = 4$ ;  $c_v = 0,722$  кДж/(кг К) и  $k = 1,4$ .



## ПРИЛОЖЕНИЯ

### 1. ОТНОСИТЕЛЬНАЯ МОЛЕКУЛЯРНАЯ МАССА И ПЛОТНОСТЬ НЕКОТОРЫХ ГАЗОВ ПРИ НОРМАЛЬНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Наименование газа	Химический символ	Относительная молекулярная масса (по углеродной шкале) $M_r$		Плотность $\rho_n$ , кг/м <sup>3</sup>
		Точное значение	Округленное значение	
Водород	H <sub>2</sub>	2,01594	2	0,0899
Метан	CH <sub>4</sub>	16,04313	16	0,7168
Аммиак	NH <sub>3</sub>	17,03061	17	0,7714
Азот	N <sub>2</sub>	28,0134	28	1,2505
Воздух	-	28,96	29	1,2928
Кислород	O <sub>2</sub>	31,9988	32	1,4290
Углекислый газ	CO <sub>2</sub>	44,00995	44	1,9770
Оксид углерода	CO	64,0628	64	2,9263

### 2. ТАБЛИЦЫ ИСТИННЫХ УДЕЛЬНЫХ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ НЕКОТОРЫХ ГАЗОВ

**Истинные удельные теплоемкости воздуха и азота**

Воздух ( $M_r = 28,970$ )				Азот (N <sub>2</sub> ) ( $M_r = 28,013$ )			
$t, ^\circ\text{C}$	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$c_v$ , кДж/(кг·К)	$k=c_p/c_v$	$t, ^\circ\text{C}$	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$c_v$ , кДж/(кг·К)	$k=c_p/c_v$
-50	1,0019	0,7147	1,402	-50	1,0387	0,7419	1,400
0	1,0032	0,7159	1,401	0	1,0387	0,7419	1,400
50	1,0057	0,7184	1,399	50	1,0400	0,7432	1,399
100	1,0098	0,7226	1,397	100	1,0421	0,7444	1,399
200	1,0241	0,7369	1,389	200	1,0517	0,7549	1,393
300	1,0446	0,7574	1,379	300	1,0693	0,7725	1,384
400	1,0680	0,7808	1,368	400	1,0911	0,7942	1,374
500	1,0919	0,8047	1,357	500	1,1158	0,8189	1,362
600	1,1149	0,8277	1,347	600	1,1396	0,8428	1,352
700	1,1355	0,8487	1,338	700	1,1618	0,8633	1,344
800	1,1547	0,8675	1,331	800	1,1824	0,8855	1,335
900	1,1706	0,8834	1,325	900	1,1999	0,9031	1,329
1000	1,1844	0,8972	1,320	1000	1,2154	0,9186	1,323
1100	1,1970	0,9098	1,315	1100	1,2292	0,9324	1,318
1200	1,2079	0,9207	1,312	1200	1,2414	0,9445	1,314
1300	1,2179	0,9307	1,308	1300	1,2518	0,9550	1,311
1400	1,2267	0,9295	1,305	1400	1,2615	0,9646	1,308
1500	1,2347	0,9475	1,303	1500	1,2694	0,9726	1,306

### Истинные удельные теплоемкости кислорода и двуокиси углерода

Кислород ( $O_2$ ) ( $M_r = 31,996$ )				Двуокись углерода ( $CO_2$ ) ( $M_r = 44,0079$ )			
$t, ^\circ C$	$c_p,$ кДж/(кг·К)	$c_v,$ кДж/(кг·К)	$k=c_p/c_v$	$t, ^\circ C$	$c_p,$ кДж/(кг·К)	$c_v,$ кДж/(кг·К)	$k=c_p/c_v$
-50	0,9102	0,6502	1,400	-50	0,7612	0,5723	1,330
0	0,9136	0,6535	1,398	0	0,8173	0,6284	1,301
50	0,9215	0,6615	1,393	50	0,8688	0,6799	1,287
100	0,9328	0,6728	1,386	100	0,9156	0,7268	1,260
200	0,9630	0,7030	1,370	200	0,9948	0,8060	1,253
300	0,9948	0,7348	1,354	300	1,0601	0,8713	1,217
400	1,0237	0,7637	1,340	400	1,1137	0,9249	1,204
500	1,0480	0,7880	1,330	500	1,1585	0,9697	1,194
600	1,0689	0,8089	1,321	600	1,1962	1,0073	1,188
700	1,0860	0,8260	1,314	700	1,2276	1,0387	1,182
800	1,0999	0,8399	1,309	800	1,2544	1,0655	1,177
900	1,1120	0,8520	1,304	900	1,2766	1,0877	1,174
1000	1,01225	0,8625	1,303	1000	1,2958	1,1070	1,171
1100	1,1317	0,8717	1,129	1100	1,3126	1,1237	1,168
1200	1,1401	0,8801	1,259	1200	1,3264	1,1376	1,166
1300	1,1476	0,8876	1,293	1300	1,3389	1,1501	1,164
1400	1,1551	0,8951	1,290	1400	1,3494	1,1606	1,163
1500	1,1627	0,9027	1,288	1500	1,3590	1,1702	1,161

### 3. УДЕЛЬНЫЕ ГАЗОВЫЕ ПОСТОЯННЫЕ НЕКОТОРЫХ ГАЗОВ И ВОДЯНОГО ПАРА

Наименование газа	Химическая формула	Удельная газовая постоянная $R$ , Дж/(кг·К)	Наименование газа	Химическая формула	Удельная газовая постоянная $R$ , Дж/(кг·К)
Водород	$H_2$	4124,30	Углекислый газ	$CO_2$	188,90
Метан	$CH_4$	518,25	Оксид углерода	$CO$	296,80
Аммиак	$NH_3$	488,20	Сернистый газ	$SO_2$	129,8
Азот	$N_2$	296,80	Водяной пар	$H_2O$	461,50
Воздух	-	287,10	Кислород	$O_2$	259,80

4. ПАРАМЕТРЫ НАСЫЩЕННОГО ВОДЯНОГО ПАРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДАВЛЕНИЯ

$p$ , МПа	$T$ , °C	$v'$ , м <sup>3</sup> /кг	$v''$ , м <sup>3</sup> /кг	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$i'$ , кДж/кг	$i''$ , кДж/кг	$r$ , кДж/кг	$s'$ , кДж/(кг·К)	$s''$ , кДж/(кг·К)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,001	6,92	0,0010001	129,9000	0,00770	29,32	2513	2484	0,1054	8,975
0,002	17,514	0,0010014	66,9700	0,01493	73,52	2533	2459	0,2609	8,722
0,005	32,88	0,0010053	28,1900	0,03547	137,83	2561	2423	0,4761	8,393
0,010	45,84	0,0010103	14,6800	0,05812	191,90	2584	2392	0,6492	8,149
0,020	60,08	0,0010171	7,6470	0,13080	251,40	2609	2358	0,8321	7,907
0,050	81,35	0,0010299	3,2390	0,30870	340,60	2645	2204	1,0910	7,593
0,10	99,64	0,0010432	1,6940	0,59030	417,40	2675	2258	1,3026	7,360
0,20	120,23	0,0010605	0,8854	1,12900	504,80	2707	2202	1,5302	7,127
0,50	151,84	0,0010927	0,3747	2,66900	640,10	2749	2109	1,860	6,822
0,80	170,42	0,0011149	0,2403	4,16100	720,90	2769	2048	2,046	6,663
1,00	179,88	0,0011273	0,1946	5,13900	762,70	2778	2015	2,138	6,587
1,20	187,95	0,0011385	0,1633	6,12400	798,30	2785	1987	2,216	6,523
1,50	198,28	0,0011539	0,1317	7,59300	844,60	2792	1947	2,314	6,445
2,00	212,37	0,0011766	0,09958	10,04100	908,50	2799	1891	2,447	6,340
2,50	223,93	0,0011972	0,07993	12,51000	961,80	2802	1840	2,554	6,256
3,00	233,83	0,0012163	0,06665	18,04000	1008,30	2804	1796	2,646	6,186
3,60	244,16	0,0012380	0,05543	15,00000	1057,50	2802	1745	2,740	6,113
4,00	250,33	0,0012520	0,04977	20,09000	1087,50	2800,6	1713,2	2,7965	6,0689
5,00	263,91	0,0012858	0,03943	25,36000	1154,20	2724,8	1316,9	3,3601	5,6147
10,00	310,96	0,0014522	0,01803	95,47000	1407,90	2724,8	1316,9	3,3601	5,6147
20,00	365,72	0,0020300	0,00586	170,50000	1826,80	2410,3	583,4	4,0147	4,9280