

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

---

**Казанский (Приволжский) федеральный университет  
Инженерный институт  
*Кафедра технической физики и энергетики***

**В.И. КРУГЛОВ, В.А. СУЛТАНОВ, В.В. ВАРЕНИК**

**Методические указания  
к выполнению  
расчетных заданий  
по курсу**

**ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА**

**Под общей редакцией  
зав. кафедрой Технической физики и энергетики  
д.т.н., проф., чл. – корр. АН РТ  
Н.Ф. Кашапова**

**Казань – 2017**

**УДК 621.1.0116.7  
ББК 31.3  
К 24**

*Принято на заседании Учебно – методической комиссии  
Инженерного института  
Протокол № 6 от «28» июня 2017 года*

**Рецензенты:**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры разработки и эксплуатации месторождений  
трудноизвлекаемых углеводородов ИГиНГТ КФУ Ф.А. Губайдуллин;  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры энергообеспечения предприятий и  
энергоресурсосберегающих технологий ИТЭ КГЭУ Е.С. Каратаева

**Методические указания к выполнению расчетных заданий по курсу  
«Термодинамика и теплопередача» / В.И. Круглов, В.А. Султанов, В.В.  
Вареник; под общ. ред. проф. Н.Ф. Кашапова. - Казань: Казан. ун-т, 2017. – 46  
с.**

Рассмотрены особенности расчета основных параметров состояния газовых смесей, используемых в качестве рабочих тел в энергетических установках. Приведены примеры расчета идеальных циклов поршневых двигателей внутреннего сгорания и идеальных циклов газотурбинных установок.

Методические указания предназначены для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям «Нефтегазовое дело» и «Техническая физика», а также могут быть полезными для студентов всех специальностей при изучении курса «Термодинамика и теплопередача».

© Круглов В.И., Султанов В.А., Вареник В.В., 2017 г.

© Казанский (Приволжский) Федеральный университет, 2017 г.

## Содержание

Условные обозначения.....	4
Введение.....	5
1 Общие сведения.....	6
1.1 Основные параметры состояния газовых смесей .....	6
1.2 Теплоемкость газовых смесей .....	11
1.3 Расчет газовых смесей .....	13
2 Циклы двигателей внутреннего сгорания.....	18
2.1 Расчет идеальных циклов поршневых ДВС .....	18
2.2 Расчет идеальных циклов газотурбинных установок.....	22
3 Примеры выполнения расчетов по циклам Тринклера, Брайтона и Гемфри.....	26
3.1 Расчет по циклу Тринклера.....	26
3.2 Расчет по циклу Брайтона.....	33
3.3 Расчет по циклу Гемфри.....	37
Приложение 1 Газовые теплоемкости и смеси .....	41
Приложение 2 Газовый цикл.....	43
Список использованных источников .....	45

## Условные обозначения

$A$  – энергия Гельмгольца;  
 $B$  – атмосферное давление, расход топлива;  
 $b$  – удельный расход топлива;  
 $C$  – теплоемкость;  
 $c$  – удельная теплоемкость;  
 $D$  – расход пара, воды;  
 $d$  – влагосодержание влажного воздуха, удельный расход пара на турбину;  
 $E$  – кинетическая и потенциальная энергия;  
 $F$  – сила;  
 $f$  – площадь;  
 $H$  – энтальпия;  
 $h$  – удельная энтальпия; постоянная Планка;  
 $K$  – константа;  
 $k$  – показатель адиабаты; постоянная Больцмана;  
 $L$  – работа;  
 $l$  – удельная работа;  
 $M$  – молярная масса (масса одного моля);  
 $m$  – масса;  
 $n$  – количество вещества (число молей), показатель политропы;  
 $P$  – вес тела;  
 $p$  – давление;  
 $Q$  – теплота;  
 $q$  – удельная теплота;  
 $R$  – удельная газовая постоянная;  
 $S$  – энтропия;  
 $s$  – удельная энтропия;  
 $T$  – термодинамическая температура (абсолютная температура);  
 $t$  – температура по шкале Цельсия;  
 $V$  – объем;  
 $v$  – удельный объем;  
 $\alpha$  – изобарный коэффициент расширения, доля отбираемого пара;  
 $\rho$  – плотность;  
 $\varepsilon$  – степень сжатия;  
 $\lambda$  – степень изохорного повышения давления;  
 $\eta_t$  – термический коэффициент полезного действия цикла;  
 $\eta_i$  – внутренний коэффициент полезного действия цикла;  
 $\pi$  – степень повышения давления.

## Введение

Одной из дисциплин, составляющих теоретическую основу технической физики и энергетики, является термодинамика и теплопередача. К настоящему времени подготовлено и издано большое количество учебников, учебных пособий и сборников задач по термодинамике и теплопередаче, в достаточной степени полно описывающих изучаемый круг вопросов. Целью настоящих методических указаний является привитие студентам умений и навыков, необходимых для выполнения термодинамических расчетов, связанных с анализом эффективности различных теплоэнергетических машин и установок, применяемых в нефтегазовой отрасли.

В качестве примеров приведены расчёты циклов двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных установок. Кроме того, представлена методика расчетов параметров циклов реальных двигателей, что может быть полезным для студентов при сравнительном анализе идеальных и реальных термодинамических циклов, а также в правильном понимании инженерных расчетов по теплопередаче.

Методические указания состоят из трех глав. В каждой главе вначале излагаются в сжатой форме необходимые теоретические сведения, а затем приводится методика решения конкретной задачи и пример расчёта.

Первая глава посвящена расчету основных параметров газовых смесей, поскольку в абсолютном большинстве энергетических установок в нефтегазовой отрасли в качестве рабочего тела используются не «чистые» вещества, а их смеси.

Во второй главе подробно освещены особенности расчёта идеальных циклов поршневых двигателей и газотурбинных установок, которые широко используются в нефтегазовой отрасли. Основное внимание уделено циклу со смешанным подводом теплоты как наиболее сложному и нашедшему широкое практическое применение.

В третьей главе подробно освещены особенности расчётов по циклам Тринклера, Брайтона и Гемфри.

В приложениях приведены варианты исходных данных, необходимых для решения задач, рассмотренных в настоящих методических указаниях.

## 1 Общие сведения

### 1.1 Основные параметры состояния газовых смесей

В современных энергетических установках в качестве рабочего тела, как правило, используются не чистые газы, а их смеси (воздух, природный газ, продукты сгорания топлива и др.) поэтому для оценки эффективности установки необходимо определить параметры состояния отдельных компонентов и смеси, а целом. Основными параметрами состояния газовой смеси так же, как и чистых газов, являются давление, объем и температура. Кроме того, состав смеси определяется массой каждого из входящих в нее газов.

В большинстве случаев состав смеси определяется с помощью массовых и молярных долей отдельных компонентов. Пусть имеется смесь, включающая в себя  $n$  идеальных газов. Очевидно, что если смесь находится в равновесии, то температуры всех газов одинаковы и равны температуре смеси  $T$ . Давление смеси обозначим –  $p$ , объём -  $V$ .

Общая масса смеси

$$m = \sum_{i=1}^n m_i, \quad (1.1)$$

где  $m_i$  - масса отдельного газа.

Массовой долей каждого компонента, называется отношение массы этого компонента к массе всей смеси:

$$g_i = \frac{m_i}{m}, \quad (i = \bar{1}, \bar{n}). \quad (1.2)$$

Очевидно, что

$$\sum_{i=1}^n g_i = 1. \quad (1.3)$$

Иногда состав задается молярными (мольными) долями. (Моль количество вещества, в котором содержится столько молекул, сколько молекул, сколько атомов в изотопе углерода  $^{12}\text{C}$  массой 0,012 кг). По известным молярным массам  $\mu_i$  можно определить количество вещества (молей) каждого компонента  $M_i$ :

$$M_i = \frac{m_i}{\mu_i} \quad (1.4)$$

Для всей смеси можно записать:

$$M = \sum_{i=1}^n M_i \quad (1.5)$$

Молярной долей компонента  $y_i$  называется отношение количества вещества этого компонента к общему количеству вещества в смеси:

$$y_i = \frac{M_i}{M}, \quad (1.6)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i = 1 \quad (1.7)$$

Молярная масса смеси  $\mu$  определяется выражением:

$$\mu = \frac{m}{M} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n y_i}. \quad (1.8)$$

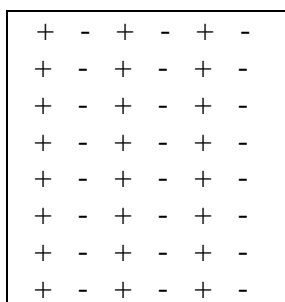
И называется кажущейся, или условной, молярной массой смеси.

При равновесном состоянии смеси молекулы каждого газа равномерно распределены по всему объёму и имеют определённую концентрацию. Соотношение между давлениями компонентов и всей смеси определяется законом Дальтона, в соответствии с которым каждый газ, входящий в газовую смесь, имеет такое же давление, какое он имел бы, занимая один весь объём газовой смеси. Закон справедлив для идеальных газов молекулы которых представляют собой материальные точки, не имеющие объёма и взаимодействующие только за счёт соударений. Давление отдельного компонента называется парциальным. Таким образом, сумма парциальных давлений  $p$  равна полному давлению смеси:

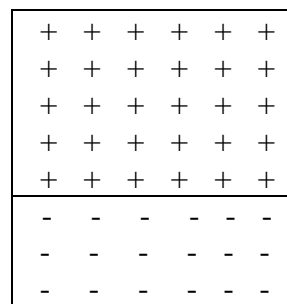
$$p = \sum_{i=1}^n p_i \quad (1.9)$$

Иногда в практике задаётся объёмный состав смеси, при этом используется понятие парциального (приведённого) объёма компонента.

Допустим, что в сосуде находится бинарная смесь газов (рисунок 1.1а).



а)



б)

Рисунок 1.1 - Парциальные объемы компонентов: а) при равномерном распределении;

б) при раздельном распределении газов

Если молекулы одного газа собрать в одной части сосуда, а другого - в другой, то, меняя объёмы газов при  $T = \text{const}$ , можно добиться равенства давлений, т.е. давления в обеих частях сосуда станут одинаковыми и равными первоначальному давлению смеси (рисунок 1.1б). Объёмы, которые при этом займут газы, называются приведёнными, т.е. приведёнными к давлению смеси. Сумма приведённых объёмов  $V_i$  равна объёму смеси  $V$ :

$$\sum_{i=1}^n V_i = V \quad (1.10)$$

Отношение приведённого объёма компонента к общему объёму смеси называется объёмной долей компонента  $r_i$ :

$$r_i = \frac{V_i}{V} \quad (1.11)$$

Поскольку температуры компонентов одинаковы и неизменны, то на основании уравнения состояния идеального газа для  $i$ -го компонента

$p_i V = p V_i$ , отсюда

$$p_i = \frac{V_i}{V} p = r_i p \quad (1.12)$$

Так как при одинаковых давлениях и температурах молярные объёмы газов  $V_{\mu_i}$  одинаковы, то для  $i$ -го газа  $V_i = V_{\mu_i} M_i$ , а для всей смеси, где  $V_{\mu_i}$  - молярный объём смеси.

$$V = V_{\mu} M \quad (1.13)$$



Отсюда очевидно, что

$$\frac{v_i}{V} = \frac{M_i}{M} \quad (1.14)$$

Следовательно, молярные доли численно равны объёмным:

$$y_i = r_i \quad (1.15)$$

Массовые и объёмные (молярные) доли могут быть связаны соотношением:

$$g_i = \frac{m_i}{m} = \frac{P_i V_i}{\sum_{i=1}^n P_i V_i} \quad (1.16)$$

Так как  $\rho = \frac{\mu_i}{\mu_i v_i}$ , то  $g_i = \frac{\mu_i r_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i r_i}$

Рассуждая аналогично, получим:

$$r_i = \frac{\frac{g_i}{\rho_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\rho_i}} = \frac{\frac{g_i}{\mu_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i}} \quad (1.17)$$

Для определения молярной массы смеси можно воспользоваться известным объёмным составом: масса  $i$ -го газа  $m_i = \mu_i M_i$ , а масса смеси  $m = \mu M$ .

Суммируя массы компонентов, получаем:

$$\mu M = \sum_{i=1}^n \mu_i M_i \quad (1.18)$$

Разделим левую и правую части последнего уравнения на  $M$ :

$$\mu = \sum_{i=1}^n \mu_i \frac{M_i}{M} \quad (1.19)$$

Поскольку  $\frac{M_i}{M} = r_i = y_i$ , то

$$\mu = \sum_{i=1}^n r_i \mu_i \quad (1.20)$$

Молярная масса смеси называется кажущейся, так как смесь не имеет

собственных молекул, а состоит из молекул, входящих в нее газов.

Парциальное давление компонента смеси  $P_i$ , можно определить по известному массовому составу смеси из уравнения состояния идеального газа:

$$p_i V = m_i R_i T, \rho_i = \frac{m_i R_i T}{V}.$$

Общее давление смеси:

$$p = \sum_{i=1}^n m_i R_i \frac{T}{V} \quad (1.21)$$

Уравнение состояния для смеси аналогично уравнению для идеального газа:

$$pV = mRT \quad (1.22)$$

Газовая постоянная  $R$  смеси может быть найдена из выражения:

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{m} R_i = \sum_{i=1}^n g_i R_i \quad (1.23)$$

Таблица 1.1 - Формулы для расчета газовых смесей

Состав смеси газов	Перевод массовых долей в объемные доли	Плотность и удельный объем смеси	Кажущаяся молекулярная масса смеси	Газовая постоянная смеси	Парциальное давление
1	2	3	4	5	6
Массовыми долями	$r_i = \frac{g_i \mu_i}{\sum_1^n g_i \mu_i}$	$v_{CM} = \sum_1^n \frac{g_i}{p_i}$ $\rho_{CM} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{g_i}{p_i}}$	$\mu_{CM} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{1}{\mu_i}}$	$R_{CM} = \sum_1^n g_i R$	$p_i = g_i x$ $x = \frac{R_i}{R_{CM}} p$
Объемными долями	$g_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_1^n r_i \mu_i}$	$p_{CM} = \sum_1^n r_i p_i$ $v_{CM} = \frac{1}{\sum_1^n r_i p_i}$	$\mu_{CM} = \sum_1^n r_i \mu_i$	$R_{CM} = \frac{8314}{\sum_1^n r_i \mu_i}$	$P_i = r_i p$

Таким образом, если для смеси заданы молярная масса и газовая постоянная, то в расчётах её можно рассматривать как идеальный газ, подчиняющийся уравнению

состояния.

В таблице 1.1 приведены основные соотношения, связывающие параметры компонентов газовых смесей.

## 1.2 Теплоемкость газовых смесей

В теплотехнических расчетах важно определить количество теплоты, выделившееся или поглощенное при изменении температуры, или, говоря другими словами, необходимо знать, какое количество теплоты требуется подвести или отвести от рабочего тела для изменения его температуры на некоторую величину. Параметр, используемый для этой цели, называется истинной теплоемкостью  $C$ , Дж/К, и определяется по выражению:

$$C = \frac{dQ}{dT}, \quad (1.24)$$

где  $C$  – истинная теплоемкость, Дж/К;  $dQ$  – элементарное количество теплоты, Дж;  $dT$  – элементарное изменение температуры, К.

Таким образом, теплоёмкость - удельная калорическая величина, представляющая собой производную от количества теплоты, поглощённой (выделенной) телом в термодинамическом процессе, по температуре. Поскольку разные количества вещества способны выделять (поглощать) разные количества теплоты при одинаковом изменении температуры, то различают:

- удельную (массовую) теплоёмкость  $c$ , Дж/(кг·К);
- молярную теплоёмкость  $\mu c$ , Дж/(кмоль·К);
- объёмную теплоёмкость  $c$ , Дж/(м<sup>3</sup>·К).

Кроме того, количество выделенной в термодинамическом процессе тепловой энергии зависит от величины изменения давления и объёма. Поэтому один из этих параметров для простоты расчетов полагают постоянным, а теплоемкость разделяют на изобарную  $c_p$  и изохорную  $c_v$ .

Теплоемкости  $c_p$  и  $c_v$  связаны между собой соотношением, известным как уравнение Майера:

$$c_p - c_v = R \quad (1.25)$$

или

$$\mu c_p - \mu c_v = \mu R = 8314 \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$$

Если требуется определить количество теплоты, выделившееся (поглощённое) на определённом интервале изменения температуры, используют среднюю теплоёмкость  $C$ :

$$C = \frac{Q_{1-2}}{t_2 - t_1} \Bigg|_{t_1}^{t_2} \quad (1.26)$$

Очевидно, что истинная теплоёмкость характеризует процесс на бесконечно малом интервале изменения температуры.

Теплоёмкость при разных температурах не является постоянной величиной. Это объясняется тем, что при увеличении температуры движение атомов и молекул становится более интенсивным и затрачивается всё больше энергии. Поэтому теплоёмкость  $C$  является функцией температуры, которую можно представить в общем случае в виде полинома

$$C = C_0 + at + bt^2 + dt^3 + \dots, \quad (1.27)$$

где  $C_0$  – теплоёмкость при температуре  $0^\circ\text{C}$ ;  $a, b, d$  - эмпирические коэффициенты, определяемые для каждого газа.

На практике коэффициентами  $b$  и  $d$  обычно пренебрегают в силу их малости и пользуются линейной зависимостью

$$C = C_0 + at \quad (1.28)$$

Если имеется выражение для истинной теплоёмкости, то среднюю теплоёмкость можно определить после преобразования из формулы

$$C = C_0 + \frac{a}{2}(t_2 - t_1) \Bigg|_{t_1}^{t_2} \quad (1.29)$$

В справочной литературе коэффициент при  $t$  уже разделён на 2, и достаточно подставить значения  $t_1$  и  $t_2$ .

Теплоёмкость газовой смеси можно определить, если задан её массовый и объёмный состав. Зная массовый состав смеси и формулы удельных теплоёмкостей компонентов  $c_i$ , теплоёмкость 1 кг смеси можно получить из выражения:

$$c_i = \sum_{i=1}^n g_i c_{0i} + \sum_{i=1}^n g_i a_i t, \quad (1.30)$$

где  $n$  - количество компонентов в смеси.

При известном объёмном составе смеси теплоёмкость  $c^*$  может быть рассчитана по формуле

$$c^* = \sum_{i=1}^n r_i c_{i}^* \quad (1.31)$$

Из известного соотношения  $c^* = \rho_0 c$ , где  $\rho_0$  - плотность газа при нормальных условиях, можно получить выражение для газовой смеси в целом:

$$c^* = \sum_{i=1}^n r_{i0} (C_{0i} + a_i t) \quad (1.32)$$

### 1.3 Расчёт газовых смесей

В качестве исходных данных примем:

- массовый состав смеси  $g_i (i=1, n)$ , где  $n$  – количество компонентов смеси;
- давление, объём и температуру смеси  $P_{см}$ ,  $V_{см}$  и  $T_1$  соответственно;
- молярные массы компонентов смеси  $\mu_i$ ;
- температуру смеси после нагревания (охлаждения)  $T_2$ .

Требуется определить:

- объёмный состав смеси;
- газовые постоянные компонентов и смеси;
- плотность и удельный объём компонентов и смеси при заданных и нормальных физических условиях;
- истинные теплоёмкости компонентов и смеси при  $p = const$  для температуры  $T_1$  (молярную, объёмную и массовую);
- средние теплоёмкости компонентов и смеси (молярную объёмную и массовую), а также затраты теплоты при изменении температуры от  $T_1$  до  $T_2$  при  $P = const$  и  $v = const$ .

#### Решение

1. Объёмные доли компонентов  $r_i$  найдём из выражения

$$r_i = \frac{g_i/\mu_i}{\sum_{i=1}^n g_i/\mu_i},$$

где  $\mu_i$  - молярная масса  $i$ -го компонента, берётся из стандартных таблиц.

Проверка:

$$\sum_{i=1}^n r_i = 1.$$

2) Определяем газовые постоянные компонентов  $R_i$ , Дж/(кг·К):

$$R_i = \frac{8314}{\mu_i};$$

3) определяем молярную массу смеси  $\mu_{CM}$ , кг/кмоль:

$$\mu_{CM} = \frac{8314}{R_{CM}}.$$

4) Удельный объём компонентов  $v_{0i}$ ,  $M^3/\text{кг}$ , и смеси  $v_{0i}$ ,  $M^3/\text{кг}$ , м<sup>3</sup>/кг, при нормальных условиях

$$v_{0i} = \frac{22,4}{\mu_i}, \quad v_{0CM} = \frac{R_{CM}T_0}{P_0}.$$

5) плотность компонентов  $\rho_{0i}$ , кг/м<sup>3</sup>, и смеси  $\rho_{0CM}$ , кг/м<sup>3</sup>, при нормальных условиях

$$\rho_{0i} = \frac{1}{v_{0i}}; \quad \rho_{0CM} = \frac{1}{v_{0CM}}.$$

6) удельный объём  $v_{CM}$ , м<sup>3</sup>/кг, и плотность  $\rho_{CM}$ , кг/м<sup>3</sup>, смеси при заданных условиях

$$v_{CM} = \frac{R_{CM}T_i}{p}; \quad \rho_{CM} = \frac{1}{v_{CM}}.$$

7) Определяем массу смеси  $m_{CM}$ , кг, и компонентов  $m_i$ , кг:

$$m_{CM} = \rho_i \cdot V_{CM}; \quad m_i = g_i m_{CM}.$$

8) Определяем плотности  $\rho_i$ , кг/м<sup>3</sup>, и удельный объём  $v_i$ , м<sup>3</sup>/кг, компонентов при пленных условиях:

$$\rho_i = \frac{m_i}{v_i}; v_i = \frac{1}{\rho_i}.$$

Проверка:

$$\sum_{i=1}^n \rho_i r_i = \rho_{CM}.$$

9) производим расчёт теплоёмкостей.

а) истинные и средние молярные теплоёмкости  $\mu_{CP}$  для компонентов смеси определим по формулам, приведённым в табл.1.2.

По данным табл.1.2 вместо  $t$  подставляем температуру по шкале Цельсия, а вместо  $T$  – температуру по шкале Кельвина.

Таблица 1.2 - Формулы расчёта теплоёмкостей компонентов смеси

Газы	Средние теплоёмкости	Истинные теплоёмкости
Азот	$28,97+0,0025t$	$28,72+0,005t-1,256 \cdot 10^{-9}t^2$
Водород	$28,78+0,00112 t$	$29,1-0,000209 t+2,324 \cdot 10^{-6}t^2$
Водяной пар	$32,88+0,00544 t$	$32,91+0,0113 t-0,159 \cdot 10^{-9}t^2$
Воздух	$29,09+0,00241 t$	$28,89+0,00623 t-0,837 \cdot 10^{-6}t^2$
Кислород	$29,55+0,0034 t$	$2,97+0,0106 t-3,55 \cdot 10^{-6}t^2$
Оксид углерода	$29,05+0,000282 t$	$28,68+0,00706 t-1,419 \cdot 10^{-5}t^2$
Углекислота	$36,04+0,02 t-6,410^{-6}t^2$	$2,6761+4,2258 \cdot 10^{-2}t-1,4247 \cdot 10^{-5}t^2$

б) Массовые истинные и средние теплоёмкости  $c_{pi}$ , Дж/(кг· К), и  $c_{vi}$ , Дж/(кг· К), компонентов получим из выражений

$$c_{pi} = \frac{\mu_{cpi}}{\mu_i}, c_{vi} = \frac{\mu_{cvi}}{\mu_i}.$$

в) объёмные истинные и средние теплоёмкости  $c^*_{pi}$ , Дж/(м<sup>3</sup>· К), и  $c^*_{vi}$ , Дж/(м<sup>3</sup>· К), компонентов получим из выражений

$$c_{p_i}^* = \frac{\mu c_{p_i}}{22,4}, \quad c_{v_i}^* = \frac{\mu c_{v_i}}{22,4}.$$

г) Теплоёмкости смеси в целом получим из следующих выражений:  
массовые

$$c_{p_{CM}} = \sum_i^n g_i c_{p_i},$$

$$c_{v_{CM}} = \sum_i^n g_i c_{v_i},$$

молярные

$$\mu c_{p_{CM}} = \sum_i^n g_i \mu c_{p_i},$$

$$\mu c_{v_{CM}} = \sum_i^n g_i \mu c_{v_i};$$

объёмные

$$c_{p_{CM}}^* = \sum_i^n g_i c_{p_i}^*,$$

$$c_{v_{CM}}^* = \sum_i^n g_i c_{v_i}^*.$$

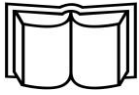
10) Количество тепловой энергии  $Q$ , Дж, выделившейся или поглощённой в интервале температур от  $T_1$  до  $T_2$ , найдём из выражений

$$Q_p = c_{p_{CM}} m (t_2 - t_1),$$

$$Q_v = c_{v_{CM}} m (t_2 - t_1).$$

Исходные данные для выполнения расчёта газовых смесей приведены в приложении 1.





## Контрольные вопросы

1. Что называется парциальным давлением и парциальным объёмом?
2. Дать формулировку закона Дальтона.
3. Поясните термин «массовая», «объемная» и «молярная» доли компонентов смеси.
4. Почему молярная масса смеси называется «кажущейся»?
5. Как определяется удельная газовая постоянная смеси?

## 2 Циклы двигателей внутреннего сгорания

### 2.1 Расчёт идеальных циклов поршневых ДВС

Конструирование и совершенствование тепловых машин основано на изучении их термодинамических циклов. Сама термодинамика как наука появилась с возникновением и развитием тепловых машин. Подробному описанию циклов двигателей внутреннего сгорания (ДВС) посвящено достаточное количество научной литературы. Реальные процессы в двигателях весьма сложны, поэтому при исследованиях вводят ряд упрощающих допущений и рассматривают как называемые идеальные циклы.

К числу этих допущений относятся следующие:

- циклы замкнуты (на самом деле продукты сгорания удаляются в атмосферу и в каждом цикле участвует новая порция топлива - воздушной смеси);
- рабочим телом считается идеальный газ с постоянной теплоёмкостью;
- процесс сгорания заменяется обратимым процессом подвода тепла  $q_1$  рабочему телу;
- цикл замыкается с помощью условного обратимого процесса отвода тепла  $q_2$  от рабочего тела;
- механические и тепловые потери не учитываются.

Циклы поршневых ДВС по способу подвода тепла делят на:

- комбинированные - с подводом тепла при  $v = const$  и  $p = const$  (Тринклера);
- с подводом тепла при  $v = const$  (Отто)
- с подводом тепла при  $p = const$  (Дизеля).

Циклы газотурбинных установок (ГТУ) подразделяются на:

- циклы с подводом тепла при  $p = const$  (Брайтона);
- циклы с подводом тепла при  $v = const$  (Гемфри).

Процессы, протекающие в идеальных циклах, делятся на:

- изотермические при  $T = const$ , описываются уравнением  $pv = const$ ;
- изохорные при  $v = const$  описываются уравнением  $\frac{p}{T} = const$ ;
- изобарные при  $p = const$ ;
- адиабатные (изоэнтропные) - без теплообмена с окружающей средой

описываются уравнением  $pv^k = const$ , где  $k = \frac{c_p}{c_v}$  показатель адиабаты.

Все эти процессы называются политропными и подчиняются уравнению  $pv^n = const$ , где величины  $n$  – показатель политропы. В зависимости от величины  $n$  можно получить уравнение для любого из перечисленных процессов.

На рисунке 2.1 показаны перечисленные процессы в  $p-v$  и  $T-s$ -координатах, где  $s$  – энтропия рабочего тела.

Рассмотрим цикл Тринклера (с комбинированным подводом теплоты). На рисунке 2.2 показаны  $p-v$  и  $T-s$ -диаграммы цикла Тринклера. Он реализован в бескомпрессорных дизелях и в настоящее время практически вытеснил двигатели, работающие по циклу Дизеля.

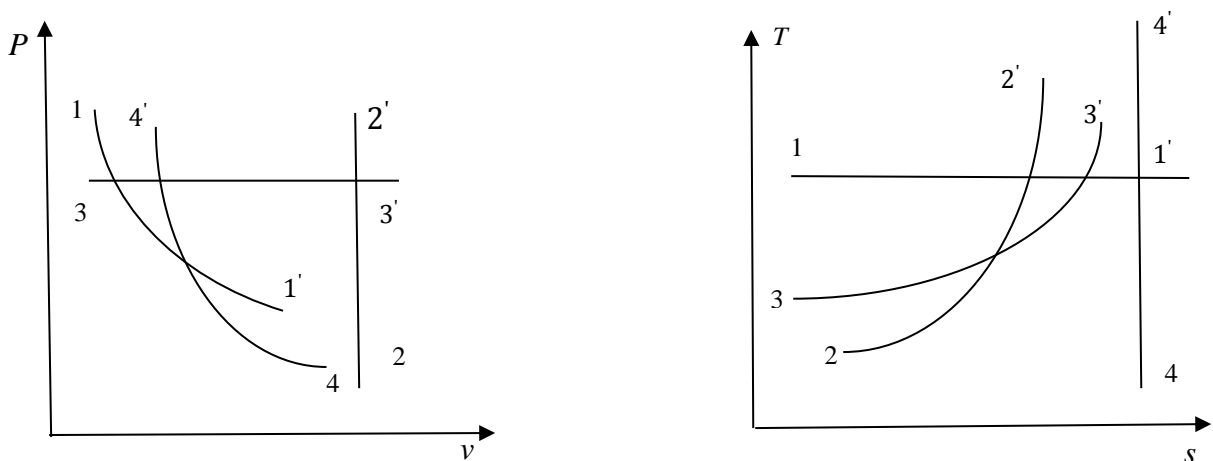


Рисунок 2.1 - Основные процессы на  $p-v$  и  $T-s$ -диаграммах:  
1-1 – изотермический; 2-2 – изохорный; 3-3 – изобарный; 4-4 – адиабатный

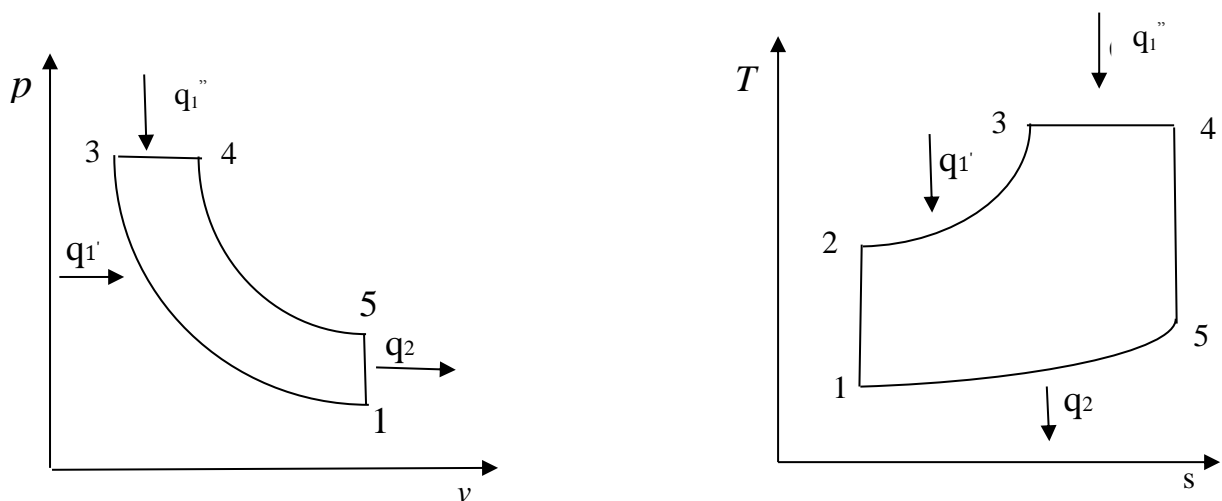


Рисунок 2.2 - Цикл Тринклера на  $p-v$  и  $T-s$ - диаграммах

В цилиндрах двигателя сжимается чистый воздух, затем, после распыливания топлива через форсунки под давлением 100-150 МПа, происходит самовоспламенение. Процесс горения идёт вначале с повышением давления при постоянном объёме (поршень не успевает начать движение), а затем при постоянном давлении с увеличением объёма (рабочий ход поршня). Таким образом, цикл состоит из следующих процессов:

- 1-2-адиабатическое сжатие; 2-3- изохорный подвод теплоты  $q_1'$  ;
- 3-4 - изобарный подвод теплоты  $q_1''$ ; 4-5- адиабатное расширение;
- 5-1 - изохорный отвод теплоты  $q_2$ .

Для расчёта цикла задаются начальные параметры рабочего тела в точке 1 и параметры цикла:

- степень сжатия  $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$ ;
- степень изохорного повышения давления  $\lambda = \frac{p_3}{p_2}$ ;
- степень предварительного (изобарного) расширения  $\rho = \frac{v_4}{v_3}$ . Параметры

рабочего тела в узловых точках:

$$\text{В точке 2} \quad \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k = \varepsilon^k; \quad p_2 = p_1 \varepsilon^k;$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1} = \varepsilon^{k-1}; \quad T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1};$$

$$\text{В точке 3} \quad \frac{p_3}{p_2} = \lambda; \quad p_3 = p_2 \lambda = p_1 \varepsilon^k \lambda;$$

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{p_3}{p_2}; \quad T_3 = T_2 \lambda = T_1 \varepsilon^{k-1} \lambda;$$

$$\text{В точке 4} \quad p_3 = p_4; \quad p_4 = p_1 \varepsilon^k \lambda;$$

$$\frac{T_4}{T_3} = \frac{v_4}{v_3} = \rho; \quad T_4 = T_3 \rho = T_1 \varepsilon^{k-1} \lambda \rho;$$

$$\text{В точке 5} \quad \frac{p_5}{p_4} = \left(\frac{v_4}{v_5}\right)^k = \left(\frac{v_4}{v_2} \cdot \frac{v_2}{v_1}\right)^k = \frac{\rho^k}{\varepsilon^k}; \quad p_5 = p_1 \lambda \rho^k;$$

$$\frac{T_5}{T_4} = \left(\frac{v_4}{v_5}\right)^{k-1} = \left(\frac{v_4}{v_2} \cdot \frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1} = \frac{\rho^{k-1}}{\varepsilon^{k-1}}; \quad T_5 = P_1 \lambda \rho^k.$$

## Термический КПД

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1' + q_1''},$$

Где

$$q_1 = q_1' + q_1''; \quad q_1' = c_v(T_3 + T_2);$$

$$q_1'' = c_p(T_4 + T_3); \quad q_2 = c_v(T_5 - T_1).$$

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

Термический КПД растет с увеличением  $\varepsilon$  и  $k$  и уменьшается с увеличением  $\rho$ . Работа теоретического цикла  $l_{ц}$ , Дж/кг, вычисляется как

$$l_{ц} = q_1 \eta_t.$$

Отношение работы к рабочему объёму  $v_h = v_1 - v_2$  характеризует среднее давление цикла  $p_{ц}$ :

$$p_{ц} = \frac{l_{ц}}{v_h} = \frac{l_{ц}}{v_1 - v_2} = \frac{l_{ц} \varepsilon}{v_1 (\varepsilon - 1)}.$$

Среднее давление комбинированного цикла

$$p_{ц} = \frac{\rho_1 \varepsilon^k}{(\kappa - 1)(\varepsilon - 1)} [(\lambda - 1) + \kappa \lambda (\rho - 1)] \eta_t$$

Циклы с подводом теплоты при постоянном объёме (Отто) и постоянном давлении (Дизеля) можно считать частными случаями комбинированного цикла Тринклера. На рисунке 2.3 представлен цикл Отто, а на рисунке 2.4 - цикл Дизеля в  $p$ - $v$ - и  $T$ - $s$ -координатах. Как видно из диаграмм на рисунках, в цикле Отто отсутствует подвод тепла при  $p = \text{const}$ , а в цикле Дизеля нет подвода тепла при  $V = \text{const}$ . Расчёт параметров обоих циклов аналогичен рассмотренному выше расчёту для цикла Тринклера. Для цикла Отто  $\rho = 1$ , а для цикла Дизеля  $\lambda = 1$ , так как процессов, характеризующихся этими показателями, в рассматриваемых циклах нет.

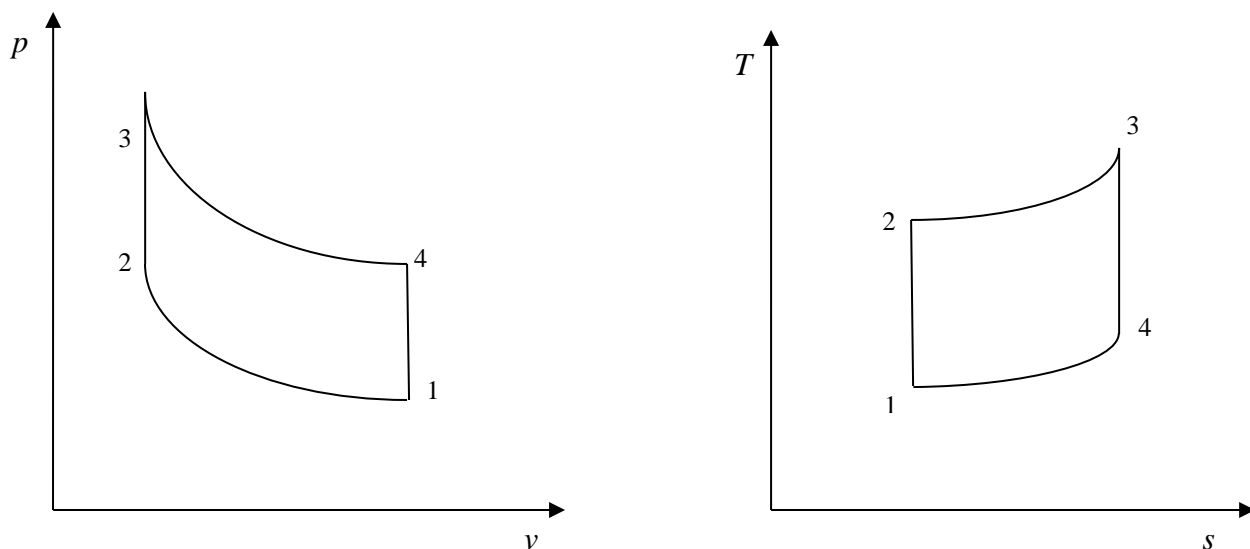


Рисунок 2.3 - Цикл Отто на  $p-v$  и  $T-s$ -диаграммах

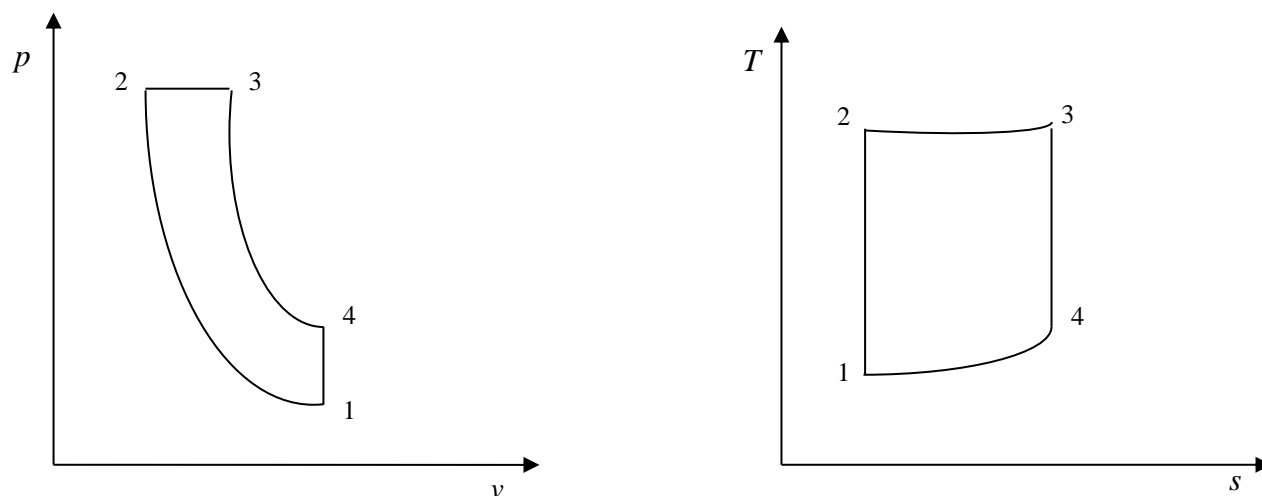


Рисунок 2.4 - Цикл Дизеля на  $p-v$  и  $T-s$ - диаграммах

## 2.2 Расчет идеальных циклов газотурбинных установок

К основным недостаткам поршневых двигателей внутреннего сгорания относятся необходимость кривошипно-шатунного механизма и неравномерность работы. Этих недостатков лишены газотурбинные установки (ГТУ). На рисунке 2.5 показана принципиальная схема ГТУ.

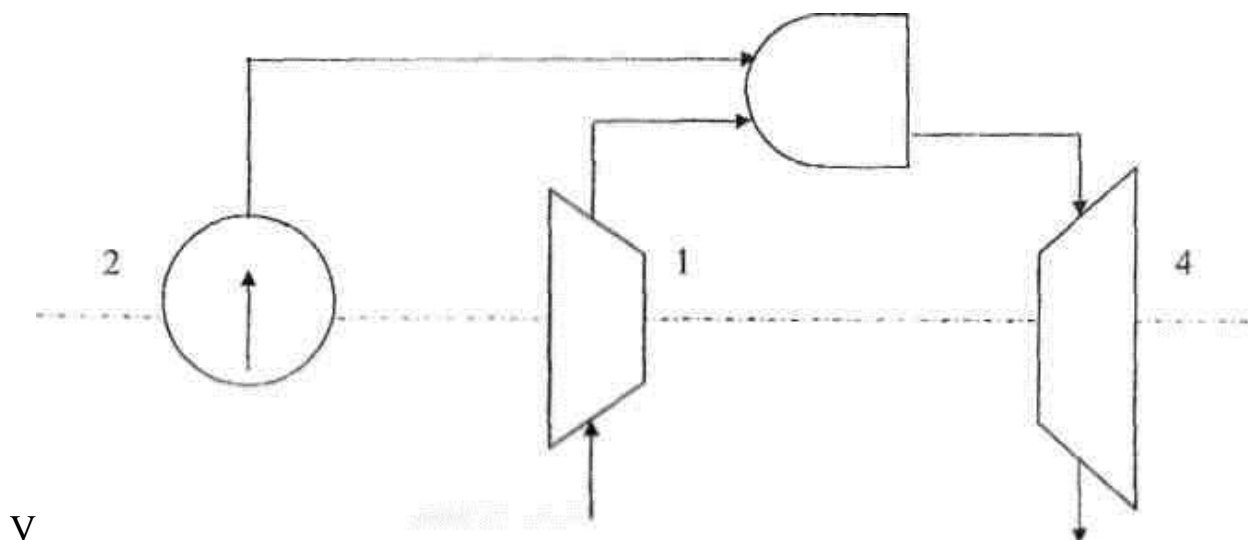


Рисунок 2.5 - Принципиальная схема ГТУ

Компрессор (1), приводимый в движение турбиной (4), подаёт воздух в камеру сгорания (3). Туда же подаётся топливо насосом (2), находящимся на одном валу с турбиной. Продукты сгорания при расширении вращают турбину и выбрасываются в атмосферу.

- ГТУ разделяются по способу сгорания топлива на два типа:
- со сгоранием при постоянном давлении (цикл Брайтона),
  - со сгоранием при постоянном объеме (цикл Гемфри)

На рисунке 2.6 представлены  $p$ - $v$ - и  $T$ - $s$ -диаграммы цикла Брайтона: 1-2-адиабатное сжатие в компрессоре; 2-3 – изобарный подвод тепла в камере сгорания; 3-4- адиабатное расширение продуктов сгорания в турбине; 4-1-изобарная отдача тепла атмосфере.

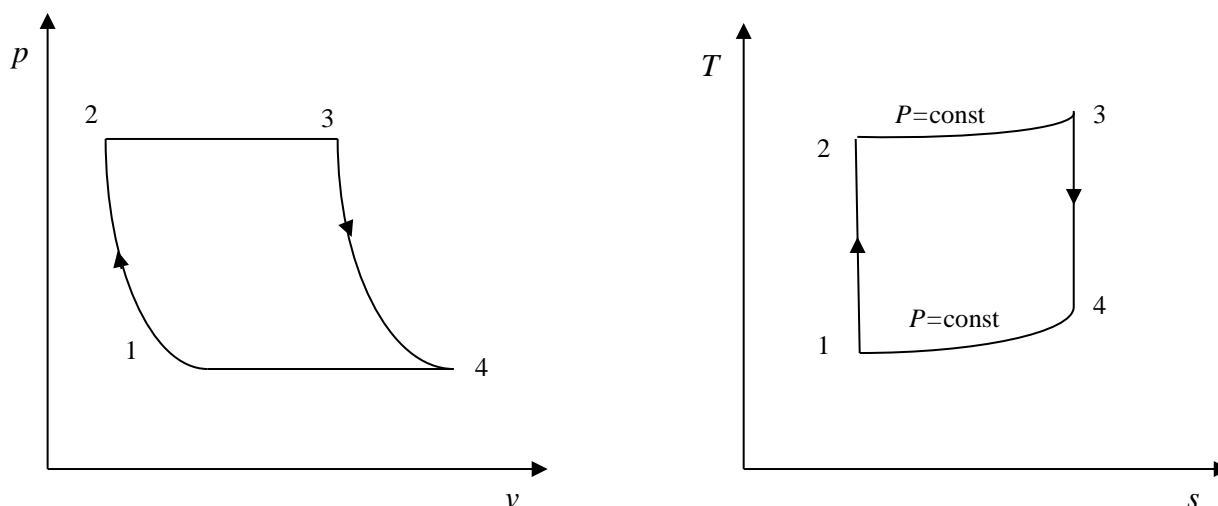


Рисунок 2.6 - Цикл Брайтона на  $p$ - $v$  и  $T$ - $s$ -диаграммах

Параметры цикла:

$$\pi = \frac{\rho_2}{\rho_1} - \text{степень повышения давления воздуха;}$$

$$\rho = \frac{v_3}{v_2} - \text{степень предварительного расширения.}$$

Параметры газа в узловых точках цикла находят по формулам для адиабатного и изобарного процессов:

$$\text{в точке 2} \quad T_2 = T_1 \pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}};$$

$$\text{в точке 3} \quad T_3 = T_1 \pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}};$$

$$\text{в точке 4} \quad T_4 = T_1 \rho$$

Термический КПД цикла  $\eta_t$  находят из общего выражения

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

или после преобразования:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}$$

Теоретическая работа цикла  $l_{\text{ц}}$  равна разности работы, получаемой в турбине  $l_{\text{т}}$  и работы, затрачиваемой в компрессоре  $l_{\text{к}}$ :

$$l_{\text{ц}} = l_{\text{т}} - l_{\text{к}} = c_p T_3 \left[ 1 - \pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - \tau \left( \pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right) \right], \quad \text{где } \tau = \frac{T_1}{T_3}.$$

Цикл Гемфри (рисунок 2.7) имеет более высокий термический КПД, чем цикл Брайтона, однако не получил широкого практического использования из-за сложности конструкции камеры сгорания и турбины.



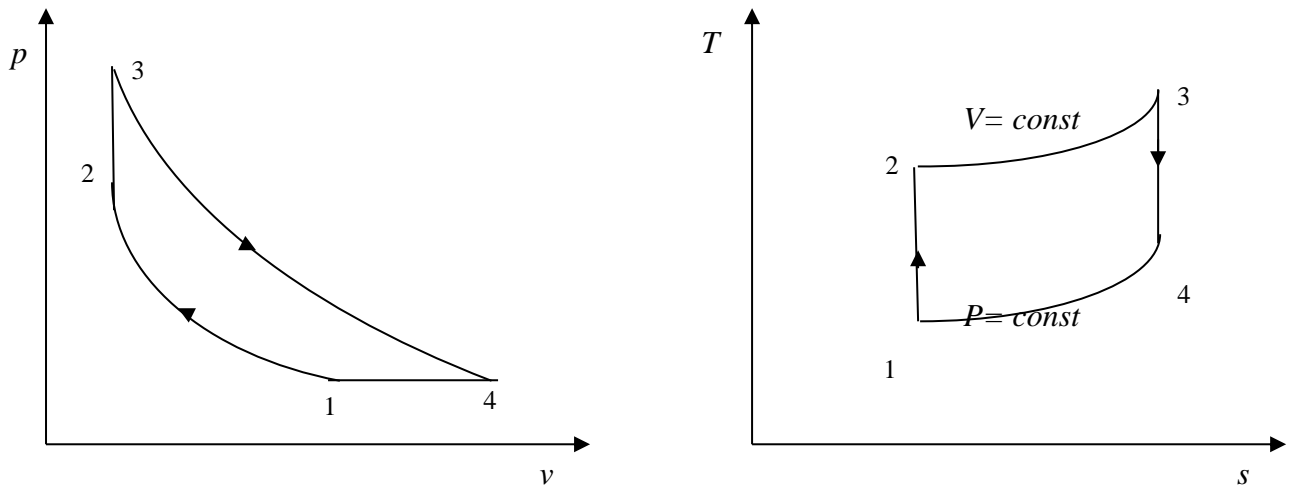


Рисунок 2.7 - Цикл Гемфри на  $p-v$  и  $T-s$ -диаграммах

На рисунке 2.7 представлены  $p-v$  и  $T-s$  диаграммы цикла Гемфри:

1-2- адиабатное сжатие в компрессоре; 2-3 - подвод тепла в камере сгорания при  $v = const$ ; 3-4 - адиабатное расширение продуктов сгорания в турбине; 4-1- изобарная отдача газом тепла в окружающей атмосфере.

Параметры цикла:

$\pi = \frac{\rho_2}{\rho_1}$  – степень повышения давления воздуха;

$\lambda = \frac{\rho_3}{\rho_2}$  – степень изохорного повышения давления.

Температура газа в узловых точках цикла:

$$\text{в точке 2} \quad T_2 = T_1 \pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}};$$

$$\text{в точке 3} \quad T_3 = T_1 \pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}};$$

$$\text{в точке 4} \quad T_4 = T_1 \lambda^{\frac{1}{\kappa}}.$$

Термический КПД  $\eta_t$  определяется по формуле

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{\kappa \left( \lambda^{\frac{1}{\kappa}} - 1 \right)}{\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} (\lambda - 1)}.$$

### 3 Примеры выполнения расчетов по циклам Тринклера, Брайтона и Гемфри

При выполнении расчетного задания необходимо пользоваться следующими формулами для политропных процессов:

$$p_1 v^{n_1} = p_2 v^{n_2}; \quad T_1 v^{n_1-1} = T_2 v^{n_2-1}; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$$

#### 3.1 Расчет по циклу Тринклера

Цикл Тринклера в  $p$ - $v$ -и  $T$ - $s$ -координатах представлен на рисунке 2.8.

Дано:

$$p_1 = 95 \text{ кПа};$$

$$\mu = 29 \text{ кг/кмоль (воздух);}$$

$$T_1 = 283 \text{ К};$$

$$c_v = \frac{5R\mu}{7\mu} = 0,717 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}};$$

$$n_1 = 1,34;$$

$$c_p = \frac{5R\mu}{7\mu} = 1,003 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}};$$

$$n_2 = 1,3;$$

$$p_0 = 101 \text{ кПа};$$

$$\varepsilon = 16;$$

$$T_0 = 273 \text{ К};$$

$$\lambda = 1,6;$$

$$v_0 = 0,775 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}};$$

$$\rho = 1,8.$$

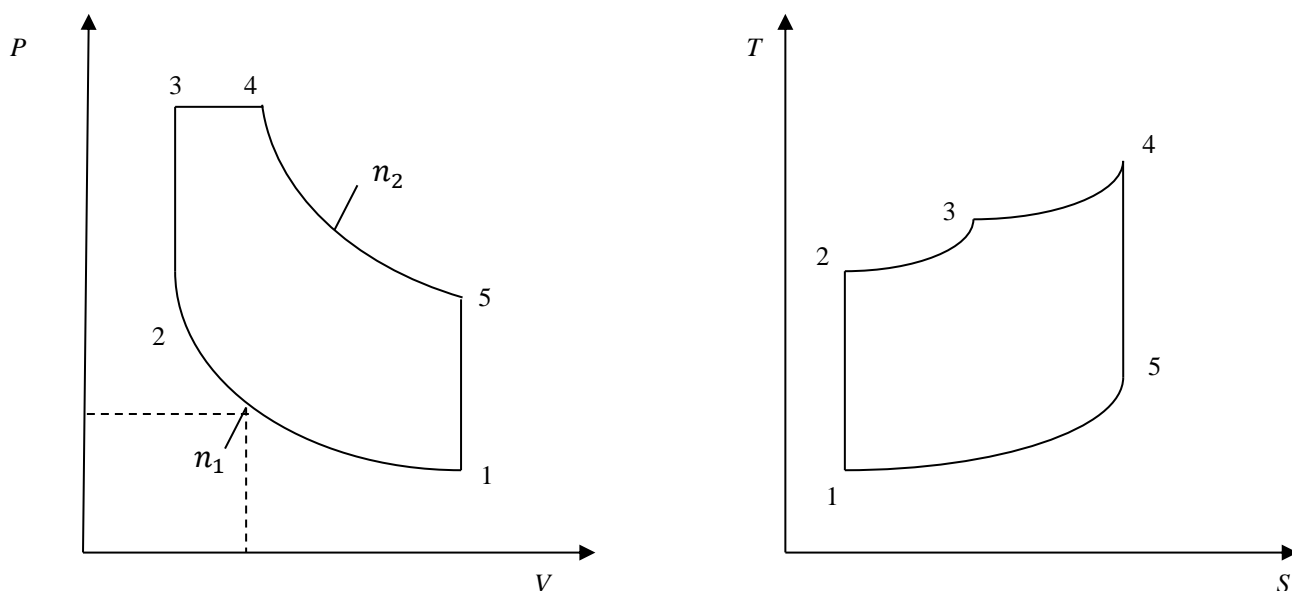


Рисунок 2.8 - Цикл Тринклера на  $p-v$  и  $T-s$ -диаграммах

Решение

1. вычисление параметров в характерны точках

а) в узловой точке 1:

$$T_1 = 283 \text{ К}, \quad p_1 = 95 \text{ кПа};$$

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = 0,854 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$u_1 = c_v(T_1 - T_0) = 7,17 \frac{\text{с[ ]}}{\text{сЗ}};$$

$$h_1 = c_p(T_1 - T_0) 10,03 \frac{\text{с[ ]}}{\text{сЗ}};$$

$$s_1 = c_v \ln \frac{p_1}{p_0} + c_p \ln \frac{v_1}{v_0} = 0,717 \cdot \ln \frac{95}{101} + 1,003 \cdot \ln \frac{0,84}{0,775} = 0,053 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

где  $u_1, h_1$  и  $s_1$  - удельные внутренняя энергия, энтальпия и энтропия рабочего тела.

б) Процесс 1-2-политропное сжатие:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n, \quad p_2 = p_1 \varepsilon^n = 95 \cdot 3901,6 \text{ кПа};$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{n-1}, \quad T_2 = T_1 \varepsilon^{n-1} = 283,16^{0,34} = 726,42 \text{ К};$$

$$u_2 = c_v(T_2 - T_0) = 325,1 \frac{\text{с[ ]}}{\text{сЗ}};$$

$$h_2 = c_p(T_2 - T_0) = 454,78 \frac{\text{с[ ]}}{\text{сЗ}};$$

$$s_2 = c_v \ln \frac{p_2}{p_0} + c_p \ln \frac{v_2}{v_0} = -0,071 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

в) процесс 2-3- изохорный подвод тепла;

$$v_3 = v_2 = 0,053 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$p_3 = p_2 \lambda = 6242,56 \text{ кПа};$$

$$T_3 = T_2 \lambda = 1162,27 \text{ К};$$

$$u_3 = c_v(T_3 - T_0) = 637,61 \frac{\text{с[ ]}}{\text{сЗ}};$$

$$h_3 = c_p(T_3 - T_0) = 891 \frac{\text{с[ ]}}{\text{сЗ}};$$

$$s_3 = c_v \ln \frac{p_3}{p_0} + c_p \ln \frac{v_3}{v_0} = -0,27 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

г) процесс 3-4- изобарный подвод тепла;

$$v_4 = v_3 \cdot \rho = 0,0954 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$p_4 = p_3 = 6242,56 \text{ кПа};$$

$$T_4 = T_3 \cdot \rho = 2092,1 \text{ К};$$

$$u_4 = c_v(T_4 - T_0) = 1304,3 \frac{\text{с[ ]}}{\text{сЗ}};$$

$$h_4 = c_p(T_4 - T_0) = 1824,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$s_4 = c_v \ln \frac{p_4}{p_0} + c_p \ln \frac{v_4}{v_0} = -0,839 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

д) процесс 4-5- политропное подвод тепла;

$$v_5 = v_1 = 0,854 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$p_5 = p_4 \left( \frac{v_4}{v_5} \right)^n = 361,31 \text{ кПа};$$

$$T_5 = \frac{p_5 v_5}{R} = 1076,28 \text{ К};$$

температуру  $T_5$  можно вычислить по формуле для изохорного процесса 5-1:

$$\frac{T_5}{T_1} = \frac{p_5}{p_1}; \quad T_5 = T_1 \frac{p_5}{p_1} = 1076,32 \text{ К};$$

$$u_5 = c_v(T_5 - T_0) = 575,96 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}};$$

$$h_5 = c_p(T_5 - T_0) = 805,69 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}};$$

$$s_5 = c_v \ln \frac{p_5}{p_0} + \hat{a}_a \ln \frac{v_5}{v_0} = -1,011 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

2. Определение  $c, \Delta u, \Delta h, \Delta s, q, l$  каждого процесса.

а) процесс 1-2-политропное сжатие:

$$c_{1-2} = c_v \frac{n - k}{n - 1} = -0,126 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$\Delta u_{1-2} = u_2 - u_1 = 317,93 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$\Delta h_{1-2} = h_2 - h_1 = 444,75 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}};$$

$$\Delta s_{1-2} = s_2 - s_1 = -0,124 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$l_{1-2} = \frac{R}{n - 1} (T_1 - T_2) = -373,39 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$\varphi_1 = \frac{n - 1}{n - k} = -5,67;$$

$$q_{1-2} = \frac{\Delta u_{1-2}}{\varphi_1} = -56,07 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

б) процесс 2-3-изохорный подвод тепла:

$$c_{2-3} = c_v = 0,717 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$\Delta u_{2-3} = u_3 - u_2 = 312,51 \frac{\text{с[ ]}}{\text{сз}};$$

$$\Delta h_{2-3} = h_3 - h_2 = 437,16 \frac{\text{с[ ]}}{\text{сз}};$$

$$\Delta s_{2-3} = s_3 - s_2 = -0,341 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$l_{2-3} = 0;$$

$$q_{2-3} = \Delta u_{2-3} = 312,51 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} = q_v;$$

в) процесс 3-4 изобарный подвод тепла:

$$c_{3-4} = c_p = 1,003 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$\Delta u_{3-4} = u_4 - u_3 = 666,69 \frac{\text{с[ ]}}{\text{сз}};$$

$$\Delta h_{3-4} = h_4 - h_3 = 932,66 \frac{\text{с[ ]}}{\text{сз}};$$

$$\Delta s_{3-4} = s_4 - s_3 = 0,589 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$l_{3-4} = R(T_4 - T_3) = p_3(v_4 - v_3) = 266,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$q_{3-4} = c_p(T_4 - T_3)\Delta h_{3-4} = \Delta h_{3-4} = 932,66 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

г) процесс 4-5-политропное расширение:

$$c_{4-5} = c_v \frac{n - k}{n - 1} = 0,239 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$\Delta u_{4-5} = u_5 - u_4 = -728,34 \frac{\text{с[ ]}}{\text{сз}};$$

$$\Delta h_{4-5} = h_5 - h_4 = -1018,91 \frac{\text{с[ ]}}{\text{сз}};$$

$$\Delta s_{4-5} = s_5 - s_4 = 0,152 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$l_{4-5} = \frac{R}{1 - n} (T_4 - T_3) = 971,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$\varphi_2 = \frac{n - 1}{n - k} = -3;$$

$$q_{4-5} = \frac{\Delta u_{4-5}}{\varphi_2} = 242,78 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

д) процесс 5-1-изохорный подвод тепла:

$$c_{5-1} = c_v = 0,717 \frac{\text{с[ ]}}{\text{сз}};$$

$$\Delta u_{5-1} = u_1 - u_5 = -568,9 \frac{\text{с[ ]}}{\text{сз}};$$

$$\Delta h_{5-1} = h_1 - h_5 = -795,66 \frac{\text{с[ ]}}{\text{сз}};$$

$$\Delta s_{5-1} = s_1 - s_5 = -0,958 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$l_{5-1} = 0;$$

$$q_{5-1} = \Delta u_{5-1} = -568,79 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Проверка:

$$\sum \Delta u_i = 0;$$

$$\sum \Delta h_i = 0;$$

$$\sum \Delta s_i = 0.$$

3. Интегральные параметры цикла.

$$l_{\text{ц}} = \sum l_i = 862,59 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Количество подведенного тепла

$$q_1 = q_{\text{подв}}.$$

Количество отведенного тепла

$$q_2 = q_{\text{отвед}} = 624 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Термический КПД цикла

$$\eta_t = t = \frac{q_2}{q_1} = 0,58.$$

Среднеинтегральная температура  $T_{i-j}$  К, для любого процесса – отношение теплоты  $q$ , участвующей в процессе, к изменению энтропии рабочего тела  $s$ :

$$T_{1-2} = \frac{q_{1-2}}{\Delta s_{1-2}} = 452,18 \text{ К}; \quad T_{2-3} = \frac{q_{2-3}}{\Delta s_{2-3}} = 916,45 \text{ К};$$

$$T_{3-4} = 1583,46 \text{ К}; \quad T_{4-5} = 1597,24 \text{ К}; \quad T_{5-1} = 593,73 \text{ К}.$$

Среднее давление смешанного цикла  $p_{\text{ц}}$  равно



$$P_{ц} = \frac{p_1 \varepsilon^{n_1}}{(n_1 - 1)(\varepsilon - 1)} [(\lambda - 1) + n_1 \lambda (\rho - 1)] \eta_{t_{CM}}.$$

КПД определяется по формуле

$$\eta_{t_{CM}} = 1 - \frac{\lambda \rho^{n_1} - 1}{\varepsilon^{n_1 - 1} [(\lambda - 1) + n_1 \lambda (\rho - 1)]}.$$

Общая формула:

$$p_{ц} = \frac{l_{ц}}{v_n}.$$

### 3.2 Расчет по циклу Брайтона

Цикл Брайтона в  $p-v$  и  $T-s$ -координатах представлен на рисунке 2.9.

Дано:  $p_1, n_1, n_2, \rho, \pi$ .

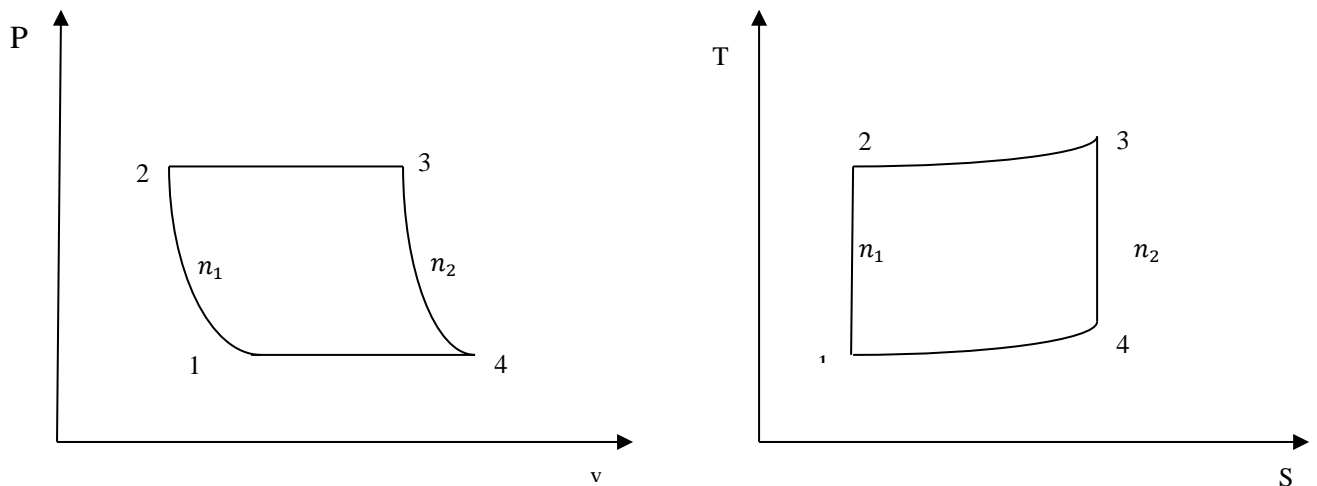


Рисунок 2.9 - Цикл Брайтона на  $p-v$  и  $T-s$ -диаграммах

Решение.

1. Вычисление параметров в характерных точках.

Дано:  $p_1; T_1; v_1 = \frac{RT_1}{p_1}; u_1 = c_v(T_1 - T_0); h_1 = c_p(T_1 - T_0);$

$$s_1 = c_v \ln \frac{p_1}{p_0} + c_p \ln \frac{v_1}{v_0}.$$

а) 1-2-политропное сжатие:

$$p_2 = p_1 \pi; \quad v_2 = \frac{v_1}{\pi^{\frac{1}{n_1}}}; \quad T_2 = \frac{p_2 v_2}{R};$$

$$u_2 = c_v(T_2 - T_0); \quad h_2 = c_p(T_2 - T_0);$$

$$s_2 = c_v \ln \frac{p_2}{p_0} + c_p \ln \frac{v_2}{v_0}.$$

б) 2-3-изобарный подвод тепла:

$$v_3 = v_2 \rho; \quad p_3 = p_2; \quad T_3 = \frac{p_3 v_3}{R};$$

$$u_3 = c_v(T_3 - T_0); \quad h_3 = c_p(T_3 - T_0);$$

$$s_3 = c_v \ln \frac{p_3}{p_0} + c_p \ln \frac{v_3}{v_0}.$$

в) 3-4-политропное расширение:

$$p_4 = p_1; \quad v_4 = \left(\frac{p_3}{p_4}\right)^{\frac{1}{n_2}} v_3; \quad T_4 = \frac{p_4 v_4}{R};$$

$$u_4 = c_v(T_4 - T_0); \quad h_4 = c_p(T_4 - T_0);$$

$$s_4 = c_v \ln \frac{p_4}{p_0} + c_p \ln \frac{v_4}{v_0}.$$

2. Определение  $c$ ,  $\Delta u$ ,  $\Delta s$ ,  $\Delta h$ ,  $q$ ,  $l$  каждого процесса.

а) 1-2-политропное сжатие:

$$c_{1-2} = c_v \frac{n - k}{n - 1}; \quad \Delta u_{1-2} = u_2 - u_1;$$

$$\Delta h_{1-2} = h_2 - h_1; \quad \Delta s_{1-2} = s_2 - s_1;$$

$$l_{1-2} = \frac{R}{n-1}(T_1 - T_2); \quad \varphi_1 = \frac{n-1}{n-k};$$

$$q_{1-2} = \frac{\Delta u_{1-2}}{\varphi_1}.$$

б) 2-3-изобарный подвод тепла:

$$c_{2-3} = c_p; \quad \Delta u_{2-3} = u_3 - u_2;$$

$$\Delta h_{2-3} = h_3 - h_2; \quad \Delta s_{2-3} = s_3 - s_2;$$

$$l_{2-3} = R(T_3 - T_2); \quad q_{2-1} = c_p(T_3 - T_2) = \Delta h_{2-3}.$$

в) 3-4-политропное расширение:

$$c_{3-4} = c_v \frac{n_2 - k}{n - 1}; \quad \Delta u_{3-4} = u_4 - u_3;$$

$$\Delta h_{3-4} = h_4 - h_3; \quad \Delta s_{3-4} = s_4 - s_3;$$

$$l_{3-4} = \frac{R}{n-1}(T_3 - T_4); \quad \varphi_2 = \frac{n_2 - 1}{n_2 - k};$$

$$q_{3-4} = \frac{\Delta u_{3-4}}{\varphi_2}.$$

г) 4-1-изобарный отвод тепла:

$$c_{4-1} = c_p; \quad \Delta u_{4-1} = u_1 - u_4;$$

$$\Delta h_{4-1} = h_1 - h_4; \quad \Delta s_{4-1} = s_1 - s_4;$$

$$l_{4-1} = R(T_1 - T_4); \quad q_{4-1} = c_p(T_1 - T_4) = \Delta h_{4-1}.$$

Проверка:  $\Delta u_i = 0$ ;  $\Delta h_i = 0$ ;  $\Delta s_i = 0$ .

3. Интегральные параметры цикла

$$l_{\text{ц}} = \sum l_i = c_p * T_3 \left[ 1 - \pi^{-\frac{n_1-1}{n_1}} - \frac{T_1}{T_3} \left( \pi^{\frac{n_1-1}{n_1}} \right) \right].$$

Количество подведенного тепла

$$q_1 = \sum q_i^{\text{подв}}.$$

Количество отведенного тепла

$$q_2 = \sum q_i^{\text{отв}}.$$

Среднеинтегральные температуры

$$t_{\text{ср}} = \frac{q}{\Delta s}.$$

Термический КПД

$$\eta_{t_p} = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{n_1-1}{n_1}}}.$$

### 3.3 Расчет по циклу Гемфри

Цикл Гемфри в  $p$ - $v$  и  $T$ - $s$ - координатах представлен на рисунке 2.10.

Дано:  $\lambda = \frac{p_3}{p_2}$ ;  $\pi = \frac{p_2}{p_1}$ .

Решение.

Вычисление параметров в характерных точках

Дано:  $p_1$ ;  $T_1$ ;  $v_1 = \frac{RT_1}{p_1}$ ;  $u_1 = c_v(T_1 - T_0)$ ;  $h_1 = c_p(T_1 - T_0)$ ;

$$s_1 = c_v \ln \frac{p_1}{p_0} + c_p \ln \frac{v_1}{v_0}.$$

а) 1-2-политропное сжатие:

$$p_2 = p_1 \pi; \quad v_2 = \frac{v_1}{\pi^{\frac{1}{n_1}}}; \quad T_2 = \frac{p_2 v_2}{R};$$

$$T_2 = T_1 \pi^{\frac{n_1-1}{n_1}}; \quad v_2 = \frac{RT_2}{p_2};$$

$$u_2 = c_v(T_2 - T_0); \quad h_2 = c_p(T_2 - T_0);$$

$$s_2 = c_v \ln \frac{p_2}{p_0} + c_p \ln \frac{v_2}{v_0}.$$

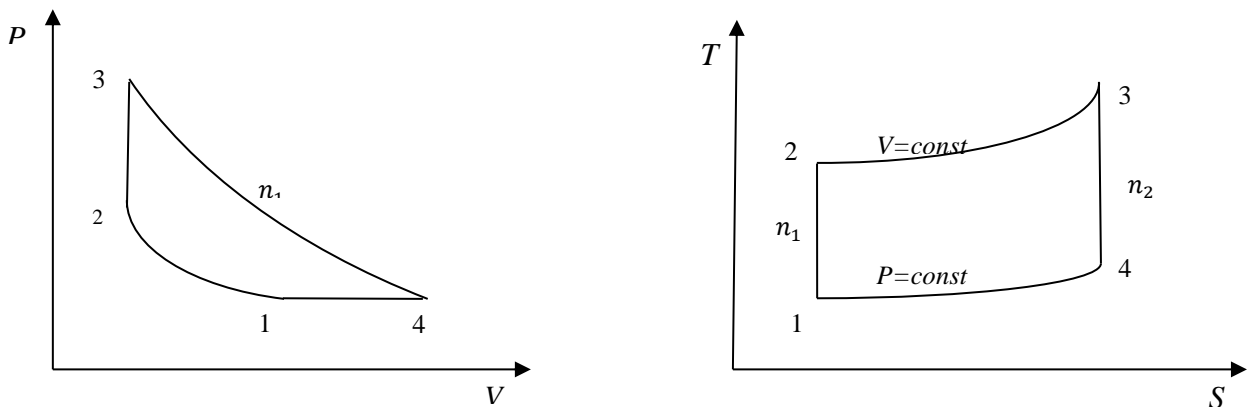


Рисунок 2.10 - Цикл Гемфри на  $p$ - $v$  и  $T$ - $s$ -диаграммах

б) 2-3-изобарный подвод тепла:

$$v_3 = v_2 \rho; \quad p_3 = p_2 \lambda; \quad T_3 = T_2 \lambda;$$

$$u_3 = c_v(T_3 - T_0); \quad h_3 = c_p(T_3 - T_0);$$

$$s_3 = c_v \ln \frac{p_3}{p_0} + c_p \ln \frac{v_3}{v_0}.$$

в) 3-4-политропное расширение:

$$p_4 = p_1; \quad v_4 = \left(\frac{p_3}{p_4}\right)^{\frac{1}{n}} v_3; \quad T_4 = \frac{p_4 v_4}{R};$$

$$u_4 = c_v(T_4 - T_0); \quad h_4 = c_p(T_4 - T_0);$$

$$s_4 = c_v \ln \frac{p_4}{p_0} + c_p \ln \frac{v_4}{v_0}.$$

2. Определение  $c$ ,  $\Delta u$ ,  $\Delta h$ ,  $\Delta s$ ,  $q$ ,  $l$  каждого процесса:

$$c_{1-2} = c_v \frac{n - k}{n - 1}; \quad \Delta u_{1-2} = u_2 - u_1;$$

$$\Delta h_{1-2} = h_2 - h_1; \quad \Delta s_{1-2} = s_2 - s_1;$$

$$l_{1-2} = \frac{R}{n - 1} (T_1 - T_2); \quad \varphi_1 = \frac{n - 1}{n - k};$$

$$q_{1-2} = \frac{\Delta u_{1-2}}{\varphi_1}.$$

а) 2-3-изохорный подвод тепла:

$$c_{2-3} = c_p; \quad \Delta u_{2-3} = u_3 - u_2;$$

$$\Delta h_{2-3} = h_3 - h_2; \quad \Delta s_{2-3} = s_3 - s_2;$$

$$l_{2-3} = 0.$$

б) 3-4-политропное расширение:

$$c_{3-4} = c_v \frac{n_2 - k}{n - 1}; \quad \Delta u_{3-4} = u_4 - u_3;$$

$$\Delta h_{3-4} = h_4 - h_3; \quad \Delta s_{3-4} = s_4 - s_3;$$

$$l_{3-4} = \frac{R}{n - 1} (T_3 - T_4); \quad \varphi_2 = \frac{n_2 - 1}{n_2 - k};$$

$$q_{3-4} = \frac{\Delta u_{3-4}}{\varphi_2}.$$

в) 4-1-изобарный отвод тепла:

$$c_{4-1} = c_p; \quad \Delta u_{4-1} = u_1 - u_4;$$

$$\Delta h_{4-1} = h_1 - h_4; \quad \Delta s_{4-1} = s_1 - s_4;$$

$$l_{4-1} = R(T_1 - T_4); \quad q_{4-1} = c_p(T_1 - T_4) = \Delta h_{4-1}.$$

Проверка:  $\Delta u_i = 0$ ;  $\Delta h_i = 0$ ;  $\Delta s_i = 0$ .

3. Интегральные параметры цикла

$$l_{\text{ц}} = \sum l_i = c_p * T_3 \left[ 1 - \pi^{-\frac{n_1-1}{n_1}} - \frac{T_1}{T_3} \left( \pi^{\frac{n_1-1}{n_1}} \right) \right].$$

Количество подведенного тепла

$$q_1 = \sum q_i^{\text{подв}}.$$

Количество отведенного тепла

$$q_2 = \sum q_i^{\text{отв}}.$$

Среднеинтегральная температура

$$T_{\text{ср}} = \frac{q}{\Delta S}.$$

Термический КПД цикла ГТУ

$$\eta_{t_p} = 1 - \frac{n_1 \left( \lambda^{\frac{1}{n_1}} - 1 \right)}{\pi^{\frac{n_1-1}{n_1}} (\lambda - 1)}$$



**Газовые теплоемкости и смеси**

В соответствии с таблицей III смесь газов (1) имеет массовый (в задачах с 1-20) или объемный (в задачах с 21 по 30) составы. Определить:

1. Объемный (массовый) состав смеси;
2. Газовые компоненты и смеси;
3. Кажущийся молекулярный вес смеси;
4. Массы и парциальные давления компонентов, если давление смеси (2) мм.ртутного столба, объем смеси (3) м<sup>3</sup> и температура (4) °С;
5. Плотность и удельный объем компонентов и смеси при заданных и нормальных физических условиях;
6. Истинные теплоемкости смеси (мольную, объемную и массовую) при  $p = const$  и  $v = const$  для указанной температуры (4);
7. Средние теплоёмкости смеси (мольную, объемную и массовую);
8. Затраты теплоты на нагревание (охлаждение) смеси до (5) °С при  $p = const$  и  $v = const$ .

Таблица III

## Параметры состояния газовой смеси

№ п/п	(1),%						(2) $p$	(3) $\nu$	(4) $t_1$	(5) $t_2$	Примечание
	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O					
1	-	71	10	8	-	11	3000	1,2	1500	600	Продукты сгорания карбюраторных двигателей
2	-	72	9	9	-	10	2800	1,4	200	650	
3	-	72	7	12	-	9	2900	1,6	300	900	
4	-	71	5	15	-	9	2700	1,8	400	1050	
5	-	73	2	17	-	8	2500	2,0	500	1250	
6	-	71	1	20	-	8	2600	1,9	450	1350	
7	1	72	-	20	-	7	2400	1,7	350	800	
8	2	73	-	18	-	7	2200	1,5	250	650	
9	3	73	-	18	-	6	2300	1,3	150	600	
10	4	73	-	18	-	5	2000	1,1	550	950	
11	8	72	-	14	-	6	2950	2,1	1000	450	Продукты сгорания дизельных двигателей
12	9	73	-	12,5	-	5,5	2850	2,2	950	400	
13	10	73	-	11,8	-	5,2	2750	2,3	900	350	
14	10,5	73	-	11,5	-	5	2650	2,4	850	300	
15	11,3	73	-	11	-	4,7	2550	2,6	800	250	
16	16	74	-	7	-	3	745	3	750	200	
17	16,5	74	-	6,7	-	2,8	735	2,9	700	200	
18	17	74	-	6,3	-	2,7	725	2,8	650	150	
19	17,2	74,5	-	5,8	-	2,5	710	2,7	600	100	
20	17,5	74,5	-	5,6	-	2,4	700	2,6	550	100	
19	17,2	74,5	-	5,8	-	2,5	710	2,7	600	100	
20	17,5	74,5	-	5,6	-	2,4	700	2,6	550	100	
21	-	51	28	12	9	-	740	1,0	100	900	Продукты сгорания газотурбинных двигателей
22	-	59	28	10	3	-	750	0,1	150	850	
23	-	53	29	5	13	-	760	0,8	200	800	
24	-	53	27	6	14	-	770	0,7	250	750	
25	-	53	24	8	15	-	780	0,6	300	600	
26	-	51	25	7	17	-	770	0,5	250	650	
27	-	57	21	10	11	-	760	0,6	200	650	
28	-	63	22	7	8	-	750	0,7	150	600	
29	-	7	37	6	50	-	740	0,8	100	550	
30	-	6	39	7	48	-	730	0,9	50	55	

Молекулярная масса  $\mu_i$  (кг/кмоль): O<sub>2</sub>-32, N<sub>2</sub>-28, CO-28, CO<sub>2</sub>-44, H<sub>2</sub>-2, H<sub>2</sub>O-18.

### Газовый цикл

Начальные параметры цикла представлены в таблице П2. Цикл поршневого двигателя имеет следующие характеристики (3): начальная температура (1)  $^{\circ}\text{C}$  и давление (2) бар. Рабочее тело-воздух  $c_p = 1,004$  кДж/(кг\*град),  $c_v = 0,716$  Дж/(кг\*град).

Требуется:

- 1) определить параметры цикла  $p, v, t, u, s, h$  для основных точек цикла;
- 2) определить  $c, \Delta u, \Delta h, \Delta s, q, l$  для каждого процесса, входящего в цикл;
- 3) найти работу цикла  $l_{\text{ц}}$  термический КПД  $\eta_t$  и среднее индикаторное давление  $p_i$ ;
- 4) определить среднеинтегральные температуры процессов;
- 5) изобразить цикл на  $T-S$  диаграмме.

## Начальные параметры цикла

№ п/п	(1)	(2)	(3)					
			$n_1$	$n_2$	$\varepsilon$	$\lambda$	$\rho$	$\pi$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	1	1,4	1,35	5	4,6	-1	-
2	+10	1,1	1,34	1,3	5,5	4,3	-1	-
3	+30	1,2	1,30	1,23	6	4,0	-1	-
4	+50	0,9	1,32	1,2	6,5	3,8	-1	-
5	+70	1,3	1,36	1,25	7	3,4	-1	-
6	-10	0,8	1,38	1,27	7,5	3,0	-1	-
7	-10	0,8	1,4	1,36	10	-1	2,2	-
8	0	0,9	1,38	1,33	10,5	-1	2,1	-
9	+10	1	1,36	1,3	11,0	-1	2,0	-
10	+30	1,1	1,34	1,28	11,5	-1	1,9	-
11	+50	1,2	1,32	1,25	12	-1	1,8	-
12	+70	1,3	1,3	1,24	12,5	-1	1,7	-
13	-10	0,85	1,3	1,25	14	1,4	2	-
14	0	0,9	1,32	1,28	15	1,5	1,9	-
15	+10	0,95	1,34	1,3	16	1,6	1,8	-
16	+35	1	1,36	1,32	17	1,7	1,7	-
17	+50	1,05	1,38	1,34	16	1,6	1,6	-
18	+70	1,1	1,4	1,36	19	1,5	1,5	-
19	-20	0,7	1,4	1,38	-	-	2	5
20	-10	0,8	1,38	1,36	-	-	1,9	5,5
21	0	0,9	1,36	1,34	-	-	1,8	6
22	+10	0,95	1,34	1,32	-	-	1,7	6,5
23	+20	1,0	1,32	1,3	-	-	1,6	7,0
24	+30	1,05	1,3	1,28	-	-	1,5	7,5
25	-20	0,7	1,4	1,38	-	1,4	-	7
26	-10	0,75	1,38	1,36	-	1,5	-	6,5
27	0	0,8	1,36	1,34	-	1,6	-	6
28	+10	0,85	1,34	1,32	-	1,7	-	5,5
29	+20	0,9	1,32	1,3	-	1,8	-	5
30	+30	0,95	1,3	1,28	-	1,9	-	4,5

## Список использованных источников

1. Бармасов А.В. Курс общей физики для природопользователей. Молекулярная физика и термодинамика: учеб. пособие / А.В. Бармасов, В.Е. Холмогоров / Под ред. А.П. Бобровского. – СПб.: БХВ-Петербург, 2013. – 499 с., ил. (Учебная литература для вузов) – ISBN 978-5-94157-731-6 <http://znanium.com/bookread2.php.book=349974>.
2. Гидравлика, пневматика и термодинамика: Курс лекций / Под ред. В.М. Филина. – М.: ИД ФОРУМ: НИЦ Инфра-М, 2013. – 320 с. (Профессиональное образование) – ISBN 978-5-8199-0358-2 <http://znanium.com/bookread2.php.book=372195>.
3. Физика: Механика. Механические колебания и волны. Молекулярная физика. Термодинамика: Учебное пособие / С.И. Кузнецов. – 4-е изд., испр. и доп. – М.: Вузовский учебник: НИЦ ИНФРА-М, 2016. – 248 с. (Профессиональное образование) – ISBN 978-5-9558-0317-3 <http://znanium.com/bookread2.php.book=412940>.
4. Ташлыкова-Бушкевич, И.И. Физика. Ч. 1. Механика. Молекулярная физика и термодинамика. Электричество и магнетизм [Электронный ресурс] : В 2 ч.: учебник / И.И. Ташлыкова-Бушкевич. - 2-е изд., испр. - Минск: Вышэйшая школа, 2014. - 303 с.: ил. - ISBN 978-985-06-2505-2. <http://znanium.com/bookread2.php?book=509708>
5. Борщевский А.Я. Физическая химия. Том 2. Статистическая термодинамика : учебник / А.Я. Борщевский. М. : Инфра-М, 2017. ? 383 с. + Доп. материалы [Электронный ресурс; Режим доступа <http://www.znanium.com>]. (Высшее образование: Бакалавриат) <http://znanium.com/bookread2.php?book=543170>
6. Механика, термодинамика и молекулярная физика : сборник задач и примеры их решения/ Дубровский В.Г., Харламов Г.В. - Новоси�.: НГТУ, 2010. - 176 с.: ISBN 978-5-7782-1410-1 <http://znanium.com/bookread2.php?book=546145>

*Учебное издание*

**Вадим Игоревич Круглов**  
**Вячеслав Андреевич Султанов**  
**Виктория Вячеславовна Вареник**

Методические указания  
к выполнению  
расчетных заданий  
по курсу

**ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА**

Под общей редакцией  
зав. кафедрой Технической физики и энергетики  
д.т.н., проф., чл. – корр. АН РТ  
**Н.Ф. Кашапова**