

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Институт высокоточных систем им. В.П. Грязева

Кафедра «Ракетное вооружение»

Утверждено на заседании кафедры  
«Ракетное вооружение»  
«\_13\_»\_01\_2021 г., протокол №5

/ И. о. зав. кафедрой  
А.В.Смирнов А.В.Смирнов

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
по проведению практических (семинарских) занятий  
по дисциплине (модулю)**

**«Термодинамика»**

**основной профессиональной образовательной программы  
вышшего образования – программы специалитета**

**по специальности  
24.05.02 Проектирование авиационных и ракетных двигателей**

**со специализацией  
Проектирование ракетных двигателей твердого топлива**

**Форма обучения: очная**

**Идентификационный номер образовательной программы: 240502-01-21**

**Тула 2021 год**

**Разработчик методических указаний**

Евланова О.А., доцент, к.т.н., доцент

(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)

  
(подпись)

## **Тема 1. Параметры состояния термодинамической системы. Законы идеальных газов. Уравнение состояния идеального газа**

### **Теоретические сведения**

Физическое состояние тела определяется некоторыми величинами, характеризующими данное состояние, которые в термодинамике называют *параметрами состояния*. К основным из них относят: удельный объем, давление и температуру.

*Удельным объемом* однородного вещества называется объем, занимаемый единицей массы данного вещества. В технической термодинамике удельный объем обозначается  $v$  и измеряется в  $\text{м}^3/\text{кг}$ :

$$v = V/m,$$

где  $V$  - объем произвольного количества вещества,  $\text{м}^3$ ;  $m$  - масса этого вещества, кг.

Плотность тела определяется как масса единицы объема и измеряется в  $\text{кг}/\text{м}^3$ :

$$\rho = m/V.$$

Удельный объем есть величина, обратная плотности, т.е.

$$v = 1/\rho; \quad \rho = 1/v; \quad v\rho = 1.$$

*Давление* определяется отношением силы, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности, к площади этой поверхности:

$$p = F/f,$$

где  $F$  - сила, действующая на поверхность (Н),  $f$  - площадь поверхности, нормальной к силе ( $\text{м}^2$ ). Единицей давления в СИ является  $\text{Па}=\text{Н}/\text{м}^2$ .

Между единицами давления и универсальной единицей давления СИ существуют следующие соотношения:

$$1 \text{ кгс}/\text{см}^2 = 98066,5 \text{ Па} \approx 98,1 \text{ кПа};$$

$$1 \text{ кгс}/\text{м}^2 = 1 \text{ мм вод.ст} = 9,80665 \text{ Па} \approx 9,81 \text{ Па};$$

$$1 \text{ мм рт.ст.} = 133,322 \text{ Па} \approx 133 \text{ Па}.$$

Термодинамическим параметром состояния является только абсолютное давление. *Абсолютным давлением* называется давление, отсчитываемое от абсолютного нуля давления или от абсолютного вакуума. Если давление в сосуде больше атмосферного, абсолютное давление в сосуде равно сумме показаний манометра и барометра:

$$p_{\text{абс.}} = p_{\text{изб}} + p_{\text{атм}},$$

если давление меньше атмосферного, абсолютное давление равно разности показаний барометра и вакуумметра:

$$p_{\text{абс.}} = p_{\text{атм}} - p_{\text{вак.}}$$

*Температура*, характеризуя степень нагретости тел, представляет собой меру средней кинетической энергии поступательного движения молекул. Измерение температуры может производиться как в градусах Кельвина, так и в градусах Цельсия. Между ними имеется следующее соотношение:

$$T \text{ К} = 273,15 + t^{\circ} \text{ С.}$$

Параметром состояния является абсолютная температура, измеряемая в градусах Кельвина.

Газы, подчиняющиеся законам Бойля-Мариотта, Гей-Люссака, Шарля и Авогадро, называются идеальными.

*Закон Бойля-Мариотта:* при постоянной температуре удельные объемы газа обратно пропорциональны его давлениям:

$$v_2/v_1 = p_1/p_2$$

или

$$pv = const.$$

*Закон Гей-Люссака:* при постоянном давлении удельные объемы идеального газа прямо пропорциональны его абсолютным температурам:

$$v_2/v_1 = T_2/T_1$$

или

$$v/T = const.$$

*Закон Шарля:* при постоянном удельном объеме абсолютные давления идеального газа прямо пропорциональны его абсолютным температурам:

$$p_2/p_1 = T_2/T_1$$

или

$$p/T = const.$$

*Закон Авогадро:* в равных объемах любых идеальных газов при одинаковых давлении и температуре содержится одно и то же количество вещества. Из него следует, что

$$\mu v = 22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль},$$

где  $\mu v$  – объем одного киломоля.

*Уравнение состояния идеальных газов* было выведено Клапейроном и имеет вид:

$$pv/T = R \text{ или } pv = RT.$$

Для произвольного количества газа с массой  $m, \text{кг}$  уравнение состояния выглядит следующим образом:

$$pv = mRT;$$

где  $p$  – абсолютное давление газа,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;  $V$  – объем произвольного количества газа,  $\text{м}^3$ ;  $m$  – масса газа,  $\text{кг}$ ;  $T$  – абсолютная температура газа,  $\text{К}$ ,  $R$  – газовая постоянная,  $\text{Дж}/\text{кг град}$ .

Уравнению Клапейрона можно придать универсальную форму, если газовую постоянную отнести не к 1 кг газа, а к 1 кмоль.

Напишем уравнение состояния для 1 кмоль газа:

$$pV_\mu = \mu RT,$$

откуда

$$\mu R = pV_\mu/T;$$

где  $\mu R$  – универсальная газовая постоянная.

При так называемых нормальных физических условиях (давлении  $101325 \text{ Н}/\text{м}^2$  и температуре  $273,15 \text{ К}$ ) объем 1 кмоль газа равен  $22,4143 \text{ м}^3/\text{кмоль}$ , а

$$\mu R = 8314,20 \text{ Дж}/\text{кмоль град} = 8,3142 \text{ кДж}/\text{кмоль град}.$$

Универсальное уравнение состояния идеальных газов (уравнение состояния Клапейрона-Менделеева), отнесенное к 1 кмоль газа, принимает следующий вид:

$$pV_\mu = 8314,20 T.$$

Газовую постоянную  $R$  можно определить по известной средней молекулярной массе  $\mu$ :

$$R = 8314,2 / \mu \text{ Дж/ кг град.}$$

### Задачи

1. В баллоне содержится кислород массой 2 кг при давлении 8,3 МПа и температуре 15° С. Вычислить вместимость баллона.
2. В пусковом баллоне дизеля находится воздух под давлением  $p_1 = 2,4$  МПа и при температуре  $T_1 = 400$  К. Найти давление в баллоне при охлаждении воздуха в нем до 15° С.
3. Воздух при начальных условиях  $V_1 = 0,05 \text{ м}^3$ ,  $T_1 = 850$  К и  $p = 3$  МПа расширяется при постоянном давлении до объема  $V_2 = 0,1 \text{ м}^3$ . Найти конечную температуру.
4. Газы, двигаясь по дымовой трубе при постоянном давлении, охлаждаются от 350 до 294° С. Найти, во сколько раз площадь верхнего отверстия трубы должна быть меньше площади нижнего отверстия при сохранении одинаковой скорости газов в ней.
5. Манометр, установленный на паровом котле, показывает давление 18 кгс/см<sup>2</sup>. Найти абсолютное давление в котле, если атмосферное давление равно 740 мм рт. ст.
6. Вакуумметр показывает разрежение 600 мм рт.ст. Каково абсолютное давление, если атмосферное давление по барометру составляет 750 мм рт.ст.?
7. После пуска ДВС давление сжатого воздуха в пусковом баллоне понизилось от 3,5 до 2,9 МПа. Определить объем израсходованного воздуха при температуре и давлении окружающей среды 18° С и 1008 гПа, если вместимость пускового баллона 0,2 м<sup>3</sup>, температура воздуха в баллоне до пуска 18° С, а после пуска 10° С.
8. В баллоне вместимостью 0,1 м<sup>3</sup> находится кислород при давлении 6 МПа и температуре 25° С. После того как из него была выпущена часть газа, показание манометра стало 3 МПа, а температура кислорода понизилась до 15° С. Определить массу выпущенного и плотность оставшегося в баллоне кислорода, если давление окружающей среды 1000 гПа.
9. Масса баллона с газом  $m_1 = 2,9$  кг, при этом давление в баллоне по манометру  $p_1 = 4$  МПа. После израсходования части газа при неизменной температуре давление в баллоне понизилось до  $p_2 = 1,5$  МПа, при этом масса баллона с газом уменьшилась до  $m_2 = 1,4$  кг. Определить плотность газа при давлении 1013 гПа, если вместимость баллона 0,5 м<sup>3</sup>.

10. ДВС мощностью 120 кВт расходует 0,024 кг топлива на 1 кг рабочего тела. Определить объемный расход ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) рабочего тела, если удельный расход топлива составляет 190 г/(кВт ч). Воздух всасывается в цилиндры ДВС из помещения с параметрами  $p=1000$  гПа,  $T=290$  К. Считать, что рабочее тело имеет физические свойства сухого воздуха.
11. Воздух при начальном давлении 0,5 МПа адиабатно расширяется до давления 0,15 МПа. Во сколько раз должен увеличиться его объем?
12. Воздух с начальным объемом 8  $\text{м}^3$  при давлении 90 кПа изотермически сжимается до давления 0,8 МПа. Найти конечный объем.
13. Определить плотность и удельный объем окиси углерода при давлении 1 бар и температуре 300 К. Газовая постоянная окиси углерода  $R=297,4$  Дж/кг К.

## Тема 2. Смеси газов. Теплоемкость.

### Теоретические сведения

*Удельной теплоемкостью* тела в данном процессе называется отношение теплоты  $dq$ , полученное единицей количества вещества при бесконечно малом изменении его состояния, к изменению температуры  $dt$ :

$$C_x = dq_x / dt.$$

Различают истинную и среднюю теплоемкости.

*Истинной* теплоемкостью называют предел отношения

$$c = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt};$$

*средней* теплоемкостью называют отношение

$$c_{cp} = \frac{q}{t_2 - t_1},$$

где  $q$  – количество теплоты;

$t_1, t_2$  – температуры начала и конца процесса.

*Средняя мольная теплоемкость* в произвольном диапазоне температур определяется по формуле

$$\mu c_{pcp} = \frac{\mu c_p|_{0}^{t_2} t_2 - \mu c_p|_{0}^{t_1} t_1}{t_2 - t_1} \text{ кДж/кмоль град},$$

где  $\mu c_{pcp}$  – средняя мольная теплоемкость в произвольном диапазоне

температур от  $t_1$  до  $t_2$  °С, кДж/кмоль град,

$\mu c_p|_{0}^{t_2}$  – средняя мольная теплоемкость в интервале температур от 0 до  $t_2$  ° С, (берется из таблиц), кДж/кмоль град,

$\mu c_p \Big|_0^{t_1}$  - средняя мольная теплоемкость в интервале температур от 0 до

$t_1$  ° С, (берется из таблиц), кДж/кмоль град,

$t_1, t_2$  - температуры начала и конца процесса.

*Средняя массовая теплоемкость* определяется по формуле

$$c_{pcp} = \frac{\mu c_{pcp}}{\mu}, \text{ кДж/кг град,}$$

где  $\mu$  - молекулярный вес газа, кг/кмоль.

*Средняя объемная теплоемкость* определяется по формуле

$$c_{pcp} = \frac{\mu c_{pcp}}{22,4}, \text{ кДж/ м}^3 \text{ град,}$$

где 22,4 – объем одного моля газа при нормальных физических условиях  
( $p=760$  мм рт.ст. и  $T=0$  ° С.)

Теплоемкости процессов при  $p = \text{const}$  и  $v = \text{const}$  связаны между собой следующими соотношениями:

а) мольные

$$\mu c_p - \mu c_v = 8,314, \text{ кДж/кмоль град;}$$

б) массовые

$$c_p - c_v = R;$$

в) объемные

$$c_p - c_v = 0,37 = \rho_n R,$$

где  $\rho_n$  - плотность при нормальных физических условиях.

Затраты тепла на нагревание или охлаждение рабочих тел определяются из соотношений:

а) для  $M$  молей

$$Q = M \mu c_{pcp} (t_2 - t_1), \text{ кДж;}$$

б) для  $G$  кг

$$Q = G c_{cp} (t_2 - t_1), \text{ кДж;}$$

в) для  $V$  м<sup>3</sup>

$$Q = V c_{cp} (t_2 - t_1), \text{ кДж.}$$

В качестве рабочих тел могут быть использованы смеси, состоящие из нескольких газов.

Уравнение состояния для 1 кг смеси выглядит следующим образом:

$$pv=R_{cm} T;$$

для  $m$  кг

$$pv=mR_{cm} T,$$

где  $R_{cm}$  – газовая постоянная смеси, Дж/ кг град;

для 1 кмоль

$$pV_\mu = R_\mu T,$$

где  $V_\mu = v_{cm} \mu_{cm}$  – объем 1 кмоль смеси;

$R_\mu = 8314$  Дж/ кмоль град – универсальная газовая постоянная;

$v$  – удельный объем смеси, м<sup>3</sup>/ кг;

$\mu_{cm}$  – средний молекулярный вес смеси, кг/кмоль.

Для определения  $R_{cm}$  и  $\mu_{cm}$  необходимо знать состав смеси, который может быть задан массовыми, объемными и мольными долями.

*Массовой долей* называется отношение массы каждого газа к общей массе смеси:

$$g_i = m_i / m_{cm}.$$

*Объемной долей* называется отношение парциального (приведенного) объема каждого газа к общему объему смеси газов:

$$r_i = V_i / V_{cm}.$$

Задание смеси *мольными долями* равнозначно заданию ее объемными долями.

Если смесь задана массовыми долями, то  $R_{cm}$  и  $\mu_{cm}$  определяют из следующих соотношений:

$$R_{cm} = \sum g_i R_i$$

или

$$\begin{aligned} R_{cm} &= 8314 \sum g_i / \mu_i, \\ \mu_{cm} &= 8314 / R_{cm} \end{aligned}$$

или

$$\mu_{cm} = 8314 / \sum g_i R_i.$$

Если смесь задана объемными долями, то

$$R_{cm} = 8314 / \mu_{cm}$$

или

$$R_{cm} = 8314 / \sum r_i \mu_i,$$

$$\mu_{cm} = 8314 \sum r_i / R_i.$$

*Парциальные давления* отдельных газов, входящих в смесь, определяют из следующих соотношений:

если смесь задана массовыми долями, то

$$p_i = p_{cm} g_i \mu_{cm} / \mu_i = p_{cm} g_i R_i / R_{cm};$$

если смесь задана объемными долями, то

$$p_i = r_i p_{cm}.$$

*Теплоемкость смеси* определяют из следующих соотношений:

- если смесь задана долями моля, то

$$\mu c_{cm} = r_1 \mu_1 c_1 + r_2 \mu_2 c_2 + \dots + r_n \mu_n c_n, \text{ кДж/кмоль град},$$

где  $\mu_1 c_1, \mu_2 c_2, \mu_n c_n$  – мольные теплоемкости отдельных газов, входящих в смесь (берут из таблиц теплоемкости);

- если смесь задана массовыми долями, то

$$c_{cm} = g_1 c_1 + g_2 c_2 + \dots + g_n c_n, \text{ кДж/ кг град},$$

где  $c_1, c_2, c_n$  – массовые теплоемкости отдельных газов, входящих в смесь;

- если смесь задана объемными долями (при нормальных физических условиях), то

$$c_{cm} = r_1 c_1 + r_2 c_2 + \dots + r_n c_n, \text{ кДж/ м}^3 \text{ град},$$

где  $c_1, c_2, c_n$  – объемные теплоемкости отдельных газов, входящих в смесь.

### Задачи

1. Объемные доли компонентов смеси идеальных газов: 25 %  $\text{CO}_2$  и 75 %  $\text{O}_2$ . Давление смеси равно 0,085 МПа, температура 100° С. Найти парциальные давления компонентов, массовые доли компонентов, молярную массу и газовую постоянную смеси, а также плотность смеси при н.у. и условиях, указанных в задаче.
2. Для смеси газов из предыдущей задачи найти: истинные молярную, массовую и объемную (при н.у.) теплоемкости смеси для температуры 500° С при  $p = \text{const}$  и при  $v = \text{const}$ ; средние молярную, массовую и объемную теплоемкости смеси для интервала температур 1000...500° С при  $p = \text{const}$ ; количество теплоты, затраченное на нагревание 5  $\text{м}^3$  (н.у.) смеси при  $p = \text{const}$  в том же интервале температур.
3. В закрытом резервуаре объемом 100 л находится воздух при 0° С и давлении 760 мм рт.ст. Определить тепло, затраченное на нагревание этого воздуха до 200° С.
4. Определить средние мольную, объемную и массовую теплоемкости в процессах при постоянном давлении и постоянном объеме в интервале температур от 0 до 1300° С для смеси газов, имеющей следующий объемный состав:  $\text{CO}_2$  – 8%,  $\text{CO}$  – 2%,  $\text{N}_2$  – 85%,  $\text{H}_2$  – 5%.
5. Смесь двух объемов водорода и одного объема кислорода называют гремучим газом. Определить газовую постоянную гремучего газа.
6. Найти количество теплоты, подводимое к кислороду, масса которого 0,2 кг, при постоянном давлении при повышении его температуры от 600 до 2000° С.
7. В баллоне вместимостью 15 л содержится воздух при давлении 0,4 МПа и температуре 30° С. Какова будет температура воздуха в результате подвода к нему 16 кДж теплоты? Удельная изохорная теплоемкость  $c_v = 717 \text{ Дж/кг К}$ .
8. К воздуху в баллоне вместимостью 100 л при давлении  $p_1 = 0,3 \text{ МПа}$  и температуре  $T_1 = 15^\circ \text{ С}$  подводится теплота в количестве 148,8 кДж. Найти конечные температуру и давление воздуха в баллоне.

9. Азот массой 0,5 кг расширяется по изобаре при давлении 0,3 МПа так, что температура его повышается от 100 до 300° С. Найти конечный объем азота и подведенную теплоту.
10. 2 кг воздуха при начальном абсолютном давлении 10 бар и температуре 600 К расширяются по адиабате до конечного давления 1 бар. Определить конечные объем и температуру.
11. Воздух расширяется в процессе  $p = 0,5$  МПа = const, при этом его объем изменяется от 0,35 до 1,8 м<sup>3</sup>. Температура в конце расширения равна 1500° С. Определить подведенное количество теплоты.
12. 12 кг воздуха при абсолютном давлении в 6 бар и температуре 300 К расширяются при постоянной температуре, при этом объем увеличивается в 4 раза. Определить начальные и конечные параметры воздуха.

### Тема 3. Первый закон термодинамики. Термодинамические процессы идеальных газов

#### **Теоретические сведения**

Уравнение первого закона термодинамики для 1 кг однородного вещества для элементарного процесса записывается в виде:

$$dq = du + pdv;$$

откуда

$$\Delta u = q_{1-2} - l_{1-2},$$

где  $\Delta u$  – изменение внутренней энергии;

$q_{1-2}$  – количество теплоты;

$l_{1-2}$  – работа процесса.

Внутренняя энергия идеального газа зависит только от его температуры, в этом случае для всех процессов идеального газа

$$du = c_v dt,$$

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_{t_1}^{t_2} c_v dt = = c_{v m} |_{0}^{t_2} t_2 - c_{v m} |_{0}^{t_1} t_1$$

или при постоянной теплоемкости:

$$u_2 - u_1 = c_v (t_2 - t_1), \text{ кДж/кг},$$

где  $c_{v m} |_{t_1}^{t_2}$  – средняя в интервале температур изохорная теплоемкость газа, кДж/кг град.

Количество тепла также может быть выражено через изменение температуры газа

$$q_{1-2} = \int_{t_1}^{t_2} c_x dt = c_{x m} |_{0}^{t_2} t_2 - c_{x m} |_{0}^{t_1} t_1$$

или  $q_{1-2} = c_x (t_2 - t_1), \text{ кДж/кг},$

где  $c_x$  – теплоемкость газа в рассматриваемом процессе, кДж/кг град.

*Работа процесса* может быть вычислена, если известна зависимость давления от объема в ходе процесса (уравнение процесса):

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p \, dv = \int_{v_1}^{v_2} f(v)dv, \text{ кДж/кг.}$$

Вводя выражение для энталпии  $i = u + pv$  в уравнение первого закона термодинамики, получим его в другом виде

$$dq = di - vdp \text{ или } q_{1-2} = i_2 - i_1 - \int_{p_1}^{p_2} vdp,$$

где  $-vdp = dl_0$  – располагаемая работа, кДж/кг.

*Энталпия* идеального газа зависит также от его температуры

$$i_2 - i_1 = c_{p,m} |_{0}^{t_2} t_2 - c_{p,m} |_{0}^{t_1} t_1,$$

или для постоянной теплоемкости:

$$i_2 - i_1 = c_p (t_2 - t_1), \text{ кДж/кг},$$

где  $c_p$  – средняя изобарная теплоемкость газа, кДж/кг град.

Используя уравнение  $dq = c_v dT + pdv$ , заменим  $p$  на  $RT/v$ , получим

$$dq = c_v dT + RTdv/v.$$

Разделив обе части последнего уравнения на  $T$ , находим

$$dq/T = c_v dT/T + Rdv/v.$$

Функция  $dq/T$  называется *энтропией*  $s$  и измеряется в Дж/град, удельная энтропия – в Дж/кг град, т.е.

$$ds = dq/T.$$

Изменение *энтропии* идеального газа вычисляют по формулам:

$$s_2 - s_1 = c_v \ln T_2/T_1 + R \ln v_2/v_1,$$

$$s_2 - s_1 = c_p \ln T_2/T_1 + R \ln p_2/p_1.$$

При исследовании термодинамических процессов находят соотношение между параметрами газа, значение параметров в характерных точках процесса, изменение внутренней энергии, энталпии, работу процесса, количество тепла.

*Изохорный процесс* ( $v=const$ ).

Уравнение процесса

$$p/T = R/v,$$

давления пропорциональны температурам:

$$p_1/p_2 = T_1/T_2.$$

Тепло, участвующее в процессе, идет на изменение внутренней энергии газа:

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

Внешняя работа газа равна нулю, так как  $dv = 0$ , т.е.

$$l = \int_{v1}^{v2} p dv = 0.$$

Располагаемая работа

$$l_0 = -v(p_2 - p_1).$$

Изменение энтропии при постоянной теплоёмкости равно

$$s_2 - s_1 = c_v \ln T_2/T_1 = c_v \ln p_2/p_1.$$

*Изобарный процесс* ( $p=\text{const}$ ).

Уравнение процесса

$$v/T = R/p,$$

объемы пропорциональны температурам:

$$v_2/v_1 = T_2/T_1.$$

Работа процесса определяется из уравнения

$$l = p(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1).$$

Тепло процесса равно изменению энталпии, поскольку располагаемая работа равна нулю:

$$dl_0 = -vdp = 0, \quad q = \Delta i = c_p (T_2 - T_1).$$

Так как при  $p=\text{const}$   $\ln p_2/p_1 = 0$ , поэтому

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} (ds/dT)_p dT = \int_{T_1}^{T_2} (c_p/T) dT = c_p \ln T_2/T_1 = c_p \ln v_2/v_1.$$

*Изотермический процесс* ( $T=\text{const}$ ).

Уравнение процесса

$$pv = RT = \text{const},$$

давления обратно пропорциональны объемам

$$p_2/p_1 = v_1/v_2.$$

Внутренняя энергия и энталпия в процессе не изменяются:

$$\Delta u = 0, \quad \Delta i = 0.$$

Количество подведенной к рабочему телу теплоты численно равно работе изменения объема

$$q = l = \int_{v1}^{v2} p dv = p_1 v_1 \ln v_2/v_1.$$

При переходе к десятичным логарифмам имеем

$$q = l = 2,3 p_1 v_1 \lg v_2/v_1 = 2,3 p_1 v_1 \lg p_1/p_2 = 2,3 RT \lg v_2/v_1 = 2,3 RT \lg p_1/p_2.$$

Располагаемая работа равна работе процесса

$$l_0 = l.$$

*Адиабатный процесс* ( $dq = 0$ ).

Уравнение процесса

$$pv^k = \text{const.}$$

Соотношения между параметрами в адиабатном процессе  
 $p_1/p_2 = (v_2/v_1)^k$ ;  $v_2/v_1 = (p_1/p_2)^{1/k}$ ;  $T_1/T_2 = (v_2/v_1)^{k-1} = (p_1/p_2)^{k-1/k}$ .

Изменение внутренней энергии, взятой с обратным знаком, равно работе процесса:

$$-\Delta u = l = \int_{v_1}^{v_2} p_1 v_1^k (dv/v^k),$$

$$-\Delta u = l = c_v (T_1 - T_2) = (1/k-1) (p_1 v_1 - p_2 v_2) = (R/k-1) (T_1 - T_2).$$

Располагаемая работа в  $k$  раз больше работы процесса:

$$l_0 = kl.$$

Для обратимого адиабатного процесса  $dq=0$ , поэтому

$$ds = dq/T = 0 \quad \text{и} \quad s_2 = s_1 = \text{const.}$$

*Политропный процесс.*

Уравнение процесса

$$pv^n = \text{const.}$$

где  $n$  – показатель политропы, который для разных процессов может иметь любое значение от  $-\infty$  до  $+\infty$ , но остается постоянным в данном процессе.

Соотношения между параметрами в политропном процессе

$$p_2/p_1 = (v_1/v_2)^n; \quad T_2/T_1 = (v_1/v_2)^{n-1}; \quad T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{n-1/n}.$$

Работа процесса может быть вычислена по формуле:

$$l = (1/n-1) (p_1 v_1 - p_2 v_2)$$

или

$$l = [p_1 v_1 / (n-1)] [1 - (v_1/v_2)^{n-1}] = [p_1 v_1 / (n-1)] [1 - (p_2/p_1)^{n-1/n}].$$

Изменение внутренней энергии газа и теплота в политропном процессе определяются по формулам:

$$\begin{aligned} \Delta u &= c_v (t_2 - t_1); \\ q &= c_n (t_2 - t_1) = c_v [(n - k) / (n-1)] (t_2 - t_1). \end{aligned}$$

Располагаемая внешняя работа в политропном процессе по аналогии с адиабатным равна

$$l_0 = - \int_{p_1}^{p_2} v dp = [n/(n-1)] (p_1 v_1 - p_2 v_2) = [n/(n-1)] R(T_1 - T_2).$$

Изменение энтальпии в политропном процессе

$$i_2 - i_1 = c_p (t_2 - t_1).$$

Изменение энтропии газа в политропном процессе определяется по формуле

$$ds = dq/T = c_n dT/T$$

или для конечного изменения состояния

$$s_2 - s_1 = c_n \ln T_2/T_1 = c_v [(n - k) / (n - 1)] \ln T_2 / T_1.$$

Показатель политропы  $n$  может быть определен по формулам:

$$n = (c_n - c_p) / (c_n - c_v), \quad n = \frac{\lg \frac{p_2}{p_1}}{\lg \frac{v_1}{v_2}}.$$

### Задачи

1. Воздух расширяется в процессе  $p = 0,5 \text{ МПа} = \text{const}$ , при этом его объем изменяется от  $0,35 \text{ до } 1,8 \text{ м}^3$ . Температура в конце расширения равна  $1500^\circ \text{ С}$ . Определить температуру воздуха в начале процесса расширения, подведенное количество теплоты, работу, совершенную в этом процессе, изменения внутренней энергии и энталпии воздуха.
2. В поршневом детандере (расширительной машине) установки глубокого охлаждения политропно расширяется воздух от начального давления  $p_1 = 20 \text{ МПа}$  и температуры  $T_1 = 20^\circ \text{ С}$  до конечного давления  $p_2 = 1,6 \text{ МПа}$ . Показатель политропы  $n = 1,25$ . Определить параметры воздуха в конце расширения, удельные значения изменения внутренней энергии и энталпии, количества теплоты, работы процесса и располагаемой работы.
3. В политропном процессе, совершающем количеством вещества гелия  $n = 2 \text{ кмоль}$ , отводится количество теплоты  $3000 \text{ кДж}$ . Начальные параметры процесса:  $p_1 = 0,15 \text{ МПа}$  и  $T_1 = 227^\circ \text{ С}$ ; конечная температура  $127^\circ \text{ С}$ . Молярная теплоемкость гелия  $\mu c_v = 12,5 \text{ кДж/кмоль К}$ . Определить показатель политропы, начальные и конечные параметры газа, изменение внутренней энергии и энталпии, работу процесса и располагаемую работу, изменение энтропии.
4. Сколько теплоты нужно сообщить при постоянном объеме газовой смеси массой  $1 \text{ кг}$ , давлением  $1,2 \text{ МПа}$  и температурой  $390^\circ \text{ С}$ , чтобы повысить давление до  $4 \text{ МПа}$ ? Удельная теплоемкость смеси  $c_v = 956 \text{ Дж/кг К}$ .
5. Азот массой  $0,5 \text{ кг}$  расширяется по изобаре при давлении  $0,3 \text{ МПа}$  так, что температура его повышается от  $100$  до  $300^\circ \text{ С}$ . Найти конечный объем азота и работу изменения объема.
6. Воздух объемом  $3 \text{ м}^3$  при температуре  $10^\circ \text{ С}$  расширяется изобарно с увеличением объема в  $1,5$  раза вследствие подвода к нему  $630 \text{ кДж}$  теплоты. Найти давление, при котором происходит процесс расширения.
7. Объем воздуха массой  $1 \text{ кг}$  при температуре  $20^\circ \text{ С}$  изотермически увеличен в  $1,5$  раза. Найти удельную работу изменения объема.
8. Воздух с начальным объемом  $8 \text{ м}^3$  при давлении  $90 \text{ кПа}$  и температуре  $20^\circ \text{ С}$  изотермически сжимается до давления  $0,8 \text{ МПа}$ . Найти конечный объем и работу изменения объема.

9. Воздух массой 2 кг при давлении  $p_1=1\text{ МПа}$  и температуре  $T_1=300^\circ\text{ С}$  расширяется по адиабате так, что объем газа увеличивается в 5 раз. Найти его конечные объем, давление и температуру.
10. Воздух объемом  $0,2 \text{ м}^3$  и давлением  $0,2 \text{ МПа}$  подогревается в цилиндре диаметром  $0,5 \text{ м}$  от  $18^\circ\text{ С}$  до  $182^\circ\text{ С}$  при постоянном давлении. Найти работу расширения воздуха и расстояние, на которое при этом передвинется поршень в цилиндре.
11. Построить политропу для воздуха в координатах  $T,s$  по двум крайним и трем промежуточным точкам, выбрав масштабы температуры и энтропии. Начальные параметры воздуха  $p_1=0,2 \text{ МПа}$  и  $T_1=30^\circ\text{ С}$ ; конечные  $p_2=1,2 \text{ МПа}$  и  $v_2=0,1 \text{ м}^3/\text{кг}$ .
12. В компрессоре сжимается воздух массой 2 кг при постоянной температуре  $200^\circ\text{ С}$  от  $p_1=0,1 \text{ МПа}$  до  $p_2=2,5 \text{ МПа}$ . Найти работу сжатия.
13. Воздух с начальным объемом  $8 \text{ м}^3$  и начальной температурой  $t_1=20^\circ\text{ С}$  сжимается по политропе с показателем  $n=1,2$  от абсолютного давления  $p_1=0,09 \text{ МПа}$  до  $p_2=0,81 \text{ МПа}$  до достижения температуры  $t_2=150^\circ\text{ С}$ . Найти конечный объем и совершенную работу.

## Тема 4. Второй закон термодинамики

### Теоретические сведения

*Термическим коэффициентом полезного действия* прямого цикла называют отношение количества теплоты, превращенной в положительную работу за один цикл, ко всей теплоте, подведенной к рабочему телу:

$$\mu_t = (q_1 - q_2) / q_1 = L - q_2 / q_1 = L / q_1,$$

где  $L$  – положительная работа, равная разности между работой расширения и сжатия.

Степень совершенства обратного цикла определяется так называемым *холодильным коэффициентом цикла*

$$\varepsilon = q_2 / L.$$

Уравнение *термического КПД цикла Карно* имеет вид

$$\mu_t = L - T_2 / T_1.$$

Для *обратного цикла Карно* холодильный коэффициент равен

$$\varepsilon = T_2 / (T_1 - T_2).$$

Математическое выражение *второго закона термодинамики* можно представить уравнением

$$\oint dQ / T \leq 0,$$

где  $dQ / T$  – алгебраическая сумма приведенных теплот; знак равенства относится к обратимым, а знак неравенства – к необратимым циклам.

*Работоспособностью* или *эксергии* тела называют максимальную полезную работу, полученную по следующему уравнению:

$$L_{\max} = (I_1 - I_0) - T_0 (S_1 - S_0),$$

где  $I_0$  и  $S_0$  – энталпия и энтропия рабочего тела в состоянии равновесия с окружающей средой,  $I_1$  и  $S_1$  – параметры первоначального состояния рабочего тела.

В этом уравнении  $(I_1 - I_0)$  представляет собой полезную внешнюю работу в обратимом адиабатном процессе, а  $T_0 (S_1 - S_0)$  – полезную внешнюю работу в обратимом изотермном процессе рабочего тела.

### Задачи

1. Рабочим телом в ГТУ является воздух. Цикл характеризуется степенью повышения давления, равной 8 и степенью предварительного расширения, равной 2,5. Какая доля подводимого количества теплоты расходуется на совершение работы и какая отводится к низшему тепловому источнику? При каких температурах высшего и низшего тепловых источников КПД цикла Карно будет равен термическому КПД ГТУ, если известно, что температура воздуха в конце процесса сжатия в компрессоре составляет 600 К?
2. Воздух в противоточном теплообменнике нагревается от температуры  $t_1 = 40^\circ \text{C}$ , а газы охлаждаются от температуры  $t_3 = 450^\circ \text{C}$  до температуры  $t_4 = 200^\circ \text{C}$ . Тепловые потери теплообменника составляют 20 % от теплоты, отдаваемой газом. Определить потерю работоспособности на 1 кг проходящего газа вследствие необратимого теплообмена. Газ и воздух считать идеальными газами, обладающими свойствами воздуха. Теплоемкость воздуха и газов считать величинами постоянными. Температура окружающей среды равна  $t_0 = 25^\circ \text{C}$ .
3. Определить работоспособность (эксергию) 1 кг воздуха, находящегося под давлением  $p_1 = 4,0 \text{ МН/м}^2$  или  $p_1 = 40 \text{ бар}$  и имеющего температуру  $t_1 = 500^\circ \text{C}$ . Температура и давление окружающей среды  $t_0 = 27^\circ \text{C}$  и  $p_0 = 1 \text{ бар}$ . Задачу решить при постоянной и переменной теплоемкостях.
4. Определить эксергию 1 кг углекислого газа, находящегося при давлении  $p = 1 \text{ МПа}$  и температуре  $T = 600 \text{ K}$  по отношению к окружающей среде с параметрами  $p_0 = 0,1 \text{ МПа}$  и  $T_0 = 293 \text{ K}$ . Теплоемкость углекислого газа  $c_p = 0,97 \text{ кДж/кг град}$ .
5. Определить увеличение энтропии и уменьшение эксергии при смешении 4 кг  $\text{H}_2$  и 1 кг  $\text{CO}_2$ , находившихся при одинаковых температуре и давлении. Температура окружающей среды  $T_0 = 293 \text{ K}$ .
6. Какое количество теплоты необходимо затратить, чтобы в политропном процессе нагреть 5 кг воздуха от  $T_1 = 300 \text{ K}$  при давлении  $p_1 = 4 \text{ бар}$  до температуры 1000 К при давлении 10 бар. Теплоемкость воздуха  $c_p = 1,0 \text{ кДж/кг град}$ .

7. Определить КПД обратимого цикла теплового двигателя, если температура нагревателя  $T_1=200^\circ\text{C}$ , а холодильника  $T_2=30^\circ\text{C}$ .
8. Определить для тех же температур (см. зад.7) холодильный КПД холодильной машины, работающей по обратному циклу.
9. При совершении некоторого обратимого цикла в тепловом двигателе к рабочему телу подводится теплота в количестве 420 МДж, при этом двигатель совершает работу 196 МДж. Чему равен термический КПД цикла?

## Тема 5. Циклы двигателей внутреннего сгорания

### Теоретические сведения

Основными характеристиками любого цикла ДВС являются:

- степень сжатия  $\varepsilon = v_1/v_2$ ;
- степень повышения давления  $\lambda = p_3/p_2$ ;
- степень предварительного или изобарного расширения  $\rho = v_3/v_2$ .

### *Цикл ДВС с подводом теплоты в процессе $v = const$*

Идеальный термодинамический цикл двигателя с изохорным подводом теплоты, состоящий из двух изохор и двух адиабат, представлен на рис. 1 в  $pv$ -диаграмме, который осуществляется следующим образом.

Идеальный газ с начальными параметрами  $p_1$ ,  $v_1$ ,  $T_1$  сжимается по адиабате 1-2 до точки 2. По изохоре 2-3 рабочему телу сообщается количество теплоты  $q_1$ . От точки 3 рабочее тело расширяется по адиабате 3-4. И, наконец, по изохоре 4-1 рабочее тело возвращается в первоначальное состояние, при этом отводится теплота  $q_2$  в теплоприемник.

Термический КПД цикла определяется следующим образом:

$$\eta_t = (q_1 - q_2)/q_1 = 1 - (q_2/q_1) = 1 - (T_4 - T_1)/(T_3 - T_2) = 1 - (1/\varepsilon^{k-1}).$$

Количество подведенной теплоты  $q_1 = c_v(T_3 - T_2)$ , а количество отведенной теплоты  $q_2 = c_v(T_4 - T_1)$ .

Параметры рабочего тела во всех характерных точках цикла равны:  
в точке 2

$$v_2 = v_1/\varepsilon; \quad p_2 = p_1(v_1/v_2)^k = p_1 \varepsilon^k; \\ T_2/T_1 = (v_1/v_2)^{k-1} = \varepsilon^{k-1} \text{ и } T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1};$$

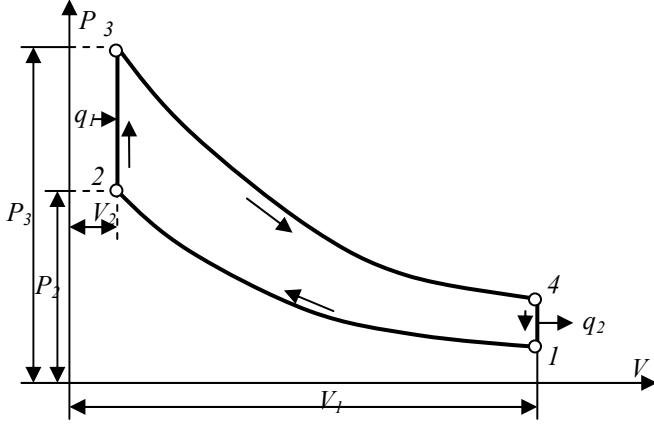


Рис.1

в точке 3

$$v_3=v_2=v_1/\varepsilon; p_3=p_2 \lambda=p_1 \varepsilon^k \lambda; \\ T_3/T_2=p_3/p_2=\lambda \text{ и } T_3=T_2 \lambda=T_1 \varepsilon^{k-1} \lambda;$$

в точке 4

$$v_4=v_1; p_4=p_3(v_3/v_4)^k=p_3(v_2/v_1)^k=p_3/\varepsilon^k=p_1 \lambda; \\ T_4/T_3=(v_3/v_4)^{k-1}=(v_2/v_1)^{k-1}=1/\varepsilon^{k-1} \text{ и } T_4=T_1 \varepsilon^{k-1} \lambda(1/\varepsilon^{k-1})=T_1 \lambda.$$

Теоретическая полезная работа, которую производит 1кг рабочего тела за один цикл, равна разности работ расширения и сжатия:

$$L=L_{\text{расш}}-L_{\text{сж}}=[1/(k-1)](p_3v_3-p_4v_4)-[1/(k-1)](p_2v_2-p_1v_1).$$

Среднее индикаторное давление (условное постоянное давление, под действием которого поршень в течение одного хода совершает работу, равную работе всего теоретического цикла) определяется по формуле:

$$p_i=L/(v_1-v_2)=p_1[(\varepsilon^k-\varepsilon)(\lambda-1)/(k-1)(\varepsilon-1)].$$

*Цикл ДВС с подводом теплоты в процессе  $p=const$*

На рис.2 в  $pV$ -диаграмме изображен идеальный цикл двигателя с постепенным сгоранием топлива при постоянном давлении, осуществляющий следующим образом. Газообразное рабочее тело с начальными параметрами  $p_1, v_1, T_1$  сжимается по адиабате 1-2, затем телу по изобаре 2-3 сообщается некоторое количество теплоты  $q_1$ . От точки 3 рабочее тело расширяется по адиабате 3-4. И, наконец, по изохоре 4-1 рабочее тело возвращается в первоначальное состояние, при этом в теплоприемник отводится теплота  $q_2$ .

Термический КПД цикла определяется следующим образом:

$$\eta_t=(q_1-q_2)/q_1=1-(q_2/q_1)=1-[ (T_4-T_1)/k(T_3-T_2)]= \\ =1-[(\rho^k-1)/k\varepsilon^{k-1}(\rho-1)].$$

Количество подведенной теплоты  $q_1=c_p(T_3-T_2)$ , а количество отведенной теплоты  $q_2=c_v(T_4-T_1)$ .

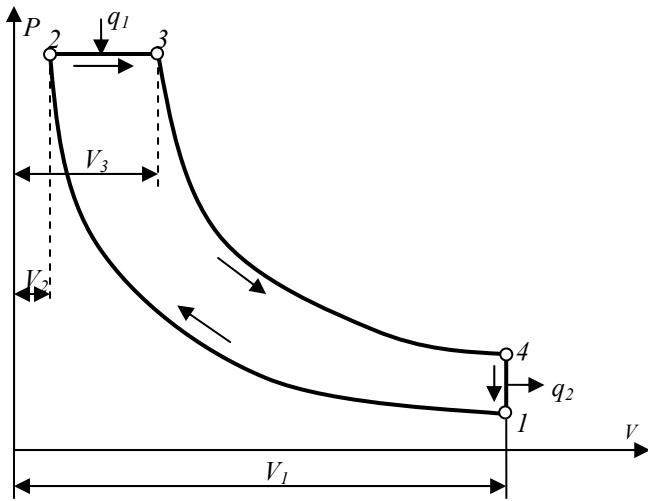


Рис.2

Параметры рабочего тела во всех характерных точках цикла равны:  
в точке 2

$$v_2 = v_1/\varepsilon; \quad p_2 = p_1 \varepsilon^k; \\ T_2/T_1 = (v_1/v_2)^{k-1} = \varepsilon^{k-1} \text{ и } T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1};$$

в точке 3

$$v_3 = v_2 \rho = v_1(\rho/\varepsilon); \quad p_3 = p_2 = p_1 \varepsilon^k; \\ T_3/T_2 = v_3/v_2 = \rho \text{ и } T_3 = T_2 \rho = T_1 \varepsilon^{k-1} \rho;$$

в точке 4

$$v_4 = v_1; \quad p_4 = p_3(v_3/v_4)^k = p_1 \varepsilon^k (v_2 \rho/v_1)^k = p_1 \rho^k; \\ T_4/T_3 = (v_3/v_4)^{k-1} = (v_3/v_1)^{k-1}, \text{ но } \rho/\varepsilon = v_1/v_2 : v_3/v_2 = v_3/v_1, \\ T_4 = T_3(\rho/\varepsilon)^{k-1} = T_1 \varepsilon^{k-1} \rho (\rho^{k-1}/\varepsilon^{k-1}) = T_1 \rho^k.$$

Теоретическая полезная работа, которую производит 1кг рабочего тела за один цикл, равна разности работ расширения и сжатия:

$$L = L_{расш} - L_{сж} = p_2(v_3 - v_2) + [1/(k-1)](p_3 v_3 - p_4 v_4) - [1/(k-1)](p_2 v_2 - p_1 v_1).$$

Среднее индикаторное давление определяется по формуле:

$$p_i = L/(v_1 - v_2) = [p_1 \varepsilon / (k-1)(\varepsilon-1)] [k \varepsilon^{k-1} (\rho-1) - (\rho^k-1)].$$

### Задачи

- Для идеального цикла поршневого двигателя с подводом теплоты при  $v=const$  определить параметры всех основных точек, полезную работу, количество подведенной и отведенной теплоты, термический КПД цикла, термический КПД цикла Карно по условиям задачи, среднее индикаторное давление, если даны  $p_1 = 1$  бар,  $T=320$  К, степень сжатия  $\varepsilon = 4,0$ , степень повышения давления  $\lambda = 4,0$ . Рабочее тело – воздух. Теплоемкость рабочего тела принять постоянной.
- Для идеального поршневого двигателя с подводом теплоты при  $p=const$  определить параметры всех основных точек, полезную

работу, количество подведенной и отведенной теплоты, термический КПД цикла, термический КПД цикла Карно по данным задачи, среднее индикаторное давление, если даны  $p_1 = 1$  бар,  $T_1 = 350$  К, степень сжатия  $\varepsilon = 20$ , степень изобарного расширения  $\rho = 2$ . Рабочее тело – воздух. Теплоемкость рабочего тела принять постоянной.

3. Для цикла ДВС с подводом теплоты при  $v = \text{const}$  определить термический КПД цикла, теоретическую мощность и среднее индикаторное давление по следующим данным: рабочее тело – сухой воздух;  $p_1 = 0,1$  МПа,  $T_1 = 10$  С, степень сжатия  $\varepsilon = 5,5$ , расход топлива составляет  $m = 0,024$  кг на 1 кг рабочего тела, теплотворная способность топлива  $Q_p = 27000$  кДж/кг, диаметр цилиндра двигателя  $D = 220$  мм, ход поршня  $H = 320$  мм, частота вращения коленчатого вала  $n = 350$  об/мин, двигатель четырехтактный.
4. Провести термодинамический анализ цикла, изображенного на рисунке, выданном преподавателем. Цикл определен следующими данными: начальные параметры рабочего тела  $p_1 = 0,1$  МПа,  $t_1 = 10^\circ\text{C}$ , степень сжатия  $\varepsilon = 7,5$ , давление  $p_3 = 6,4$  МПа. Рабочее тело – 1 кг сухого воздуха.

## Тема 6. Циклы газотурбинных установок

### Теоретические сведения

#### *Цикл ГТУ с подводом теплоты в процессе $p = \text{const}$*

На рис.3 представлен идеальный цикл газотурбинной установки на  $pv$ -диаграмме с подводом теплоты при  $p = \text{const}$ . Рабочее тело с начальными параметрами  $p_1$ ,  $v_1$ ,  $T_1$  сжимается по адиабате 1-2 до точки 2. От точки 2 к рабочему телу подводится некоторое количество теплоты  $q_1$  по изобаре 2-3. Затем рабочее тело расширяется по адиабате 3-4 до начального давления и возвращается по изобаре 4-1 в первоначальное состояние, при этом отводится теплота  $q_2$ .

Характеристиками цикла являются:

- степень повышения давления в компрессоре  $\beta = p_2/p_1$ ;
- степень изобарного расширения  $\rho = v_3/v_2$ .

Количество подводимой теплоты определяется по формуле

$$q_1 = c_p (T_3 - T_2),$$

а количество отводимой теплоты  $q_2 = c_p (T_4 - T_1)$ .

Термический КПД цикла равен

$$\eta_t = 1 - q_2/q_1 = 1 - c_p(T_4 - T_1) / c_p(T_3 - T_2) = 1 - (T_4 - T_1) / (T_3 - T_2) \text{ или}$$

$$\eta_t = 1 - 1 / \beta^{(k-1)/k}.$$

Температуры характерных точек  $T_2$ ,  $T_3$  и  $T_4$  определим, выразив их через начальную температуру  $T_1$ :

для адиабаты 1-2  $T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{(k-1)/k} = \beta^{(k-1)/k}$ ;  $T_2 = T_1 \beta^{(k-1)/k}$ ;

для изобары 2-3  $T_3/T_2 = v_3/v_2 = \rho$ ;  $T_3 = T_2 \rho$ ;  $T_3 = T_1 \rho \beta^{(k-1)/k}$ ;

для адиабаты 3-4

$$T_4/T_3 = (p_4/p_3)^{(k-1)/k} = (p_1/p_2)^{(k-1)/k} = 1/\beta^{(k-1)/k};$$

$$T_4 = T_1 \beta^{(k-1)/k} \rho / \beta^{(k-1)/k} = T_1 \rho.$$

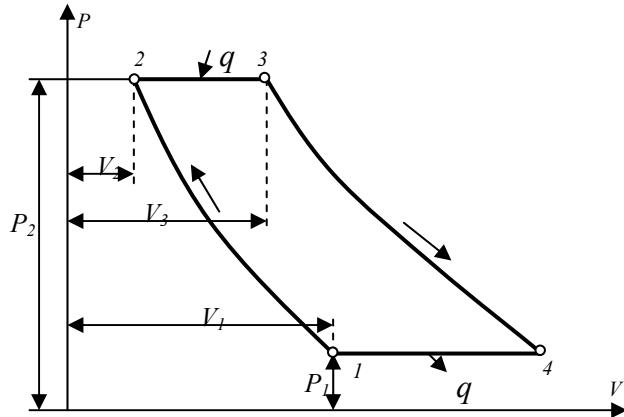


Рис.3

Работа сжатия определяется по формуле:

$$L_1 = p_1(v_4 - v_1) + [1/(k-1)] (p_2v_2 - p_1v_1);$$

Работа расширения

$$L_2 = p_2(v_3 - v_2) + [1/(k-1)] (p_3v_3 - p_4v_4).$$

Полезная работа определяется как разность работ расширения и сжатия.

#### *Цикл ГТУ с подводом теплоты в процессе $v = const$*

На рис.4 изображен идеальный цикл ГТУ с подводом теплоты при  $v=const$ , осуществляемый следующим образом. Рабочее тело с начальными параметрами  $p_1, v_1, T_1$  сжимается по адиабате 1-2 до точки 2, давление в которой определяется степенью повышения давления. Далее по изохоре 2-3 к рабочему телу подводится некоторое количество теплоты  $q_1$ , затем рабочее тело расширяется по адиабате 3-4 до начального давления (точка 4) и возвращается в первоначальное состояние по изобаре 4-1, при этом отводится теплота  $q_2$ .

Характеристиками цикла являются:

- степень повышения давления в компрессоре  $\beta = p_2/p_1$ ;
- степень добавочного повышения давления  $\lambda = p_3/p_2$ .

Количество подводимой теплоты определяется по формуле

$$q_1 = c_v (T_3 - T_2),$$

а количество отводимой теплоты:  $q_2 = c_p (T_4 - T_1)$ .

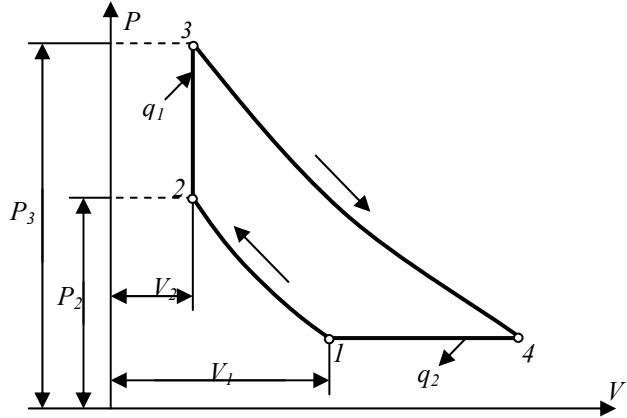


Рис.4

Термический КПД цикла равен

$$\eta_t = 1 - q_2/q_1 = 1 - c_p(T_4 - T_1)/c_v(T_3 - T_2) = 1 - [k(T_4 - T_1)/(T_3 - T_2)] \text{ или}$$

$$\eta_t = 1 - [k(\lambda^{1/k} - 1)] / [\beta^{(k-1)/k}(\lambda - 1)].$$

Температуры характерных точек  $T_2$ ,  $T_3$  и  $T_4$  определим, выразив их через начальную температуру рабочего тела  $T_1$ :

для адиабаты 1-2  $T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{(k-1)/k} = \beta^{(k-1)/k}; T_2 = T_1 \beta^{(k-1)/k};$

для изохоры 2-3  $T_3/T_2 = p_3/p_2 = \lambda; T_3 = T_2 \lambda; T_3 = T_1 \lambda \beta^{(k-1)/k};$

для адиабаты 3-4  $T_4/T_3 = (p_4/p_3)^{(k-1)/k} = (p_1/p_1 \beta \lambda)^{(k-1)/k} = 1/(\beta \lambda)^{(k-1)/k};$

$$T_4 = T_3 (1/\beta \lambda)^{(k-1)/k} = T_1 \beta^{(k-1)/k} \lambda (1/\beta \lambda)^{(k-1)/k} \text{ и } T_4 = T_1 \lambda^{1/k}.$$

Работа сжатия определяется по формуле:

$$L_1 = p_1(v_4 - v_1) + [1/(k-1)] (p_2 v_2 - p_1 v_1);$$

Работа расширения

$$L_2 = [1/(k-1)] (p_3 v_3 - p_4 v_4).$$

Полезная работа определяется как разность работ расширения и сжатия.

### *Цикл ГТУ с регенерацией теплоты в процессе $p = const$*

Идеальный цикл ГТУ с регенерацией теплоты показан на рис.5 и 6. На этих рисунках: 1-2 – адиабатное сжатие воздуха в компрессоре; 2-5 – изобарный подвод теплоты в регенераторе; 5-3 – подвод теплоты при постоянном давлении в камере сгорания; 3-4 – адиабатное расширение продуктов сгорания в соплах турбины; 4-6 – изобарный отвод теплоты от газов в регенераторе; 6-1 – изобарный отвод теплоты от газов по выходе из регенератора теплоприемнику.

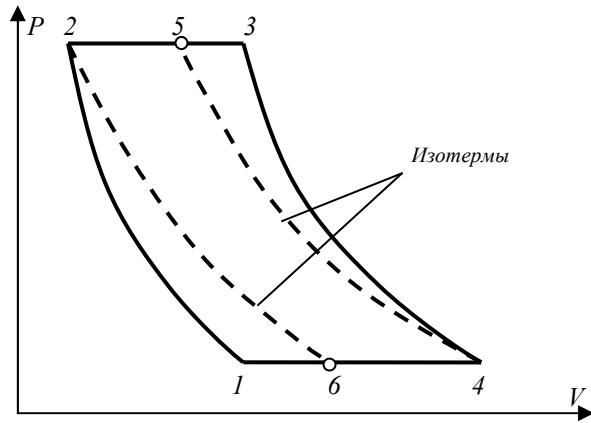


Рис.5

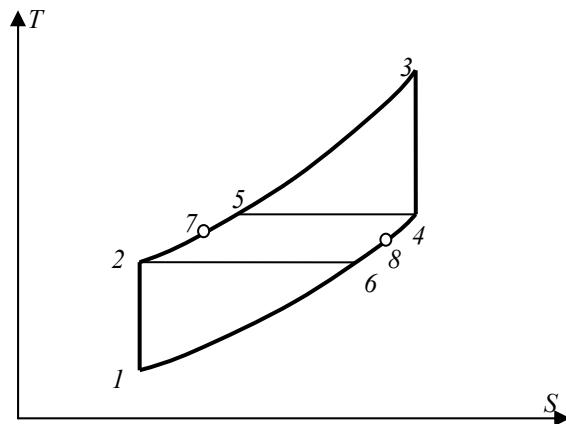


Рис.6

Если предположить, что охлаждение газов в регенераторе происходит до температуры воздуха, поступающего в него, т.е. от  $T_4$  до  $T_6=T_2$ , то регенерация будет полная.

Термический КПД цикла при полной регенерации, когда  $T_4 - T_6 = T_5 - T_2$ , находится по уравнению  $\eta_t = 1 - q_2/q_1$ , где  $q_1 = c_p(T_3 - T_5) = c_p(T_3 - T_4)$ , а  $q_2 = c_p(T_6 - T_1) = c_p(T_2 - T_1)$ , тогда  $\eta_t = 1 - [(T_2 - T_1) / (T_3 - T_4)]$ .

Температуры в основных точках цикла определяются так:

$$T_2 = T_1(p_2/p_1)^{(k-1)/k} = T_1\beta^{(k-1)/k}; \quad T_3 = T_1\beta^{(k-1)/k}\rho; \quad T_4 = T_1\rho.$$

$$\text{КПД цикла } \eta_{t\ pe} = 1 - 1/\rho = 1 - T_1/T_4.$$

### Задачи

1. Для идеального цикла ГТУ с подводом теплоты при  $p=\text{const}$  определить параметры характерных точек, работу расширения, сжатия и полезную, количество подведенной и отведенной теплоты,

- термический КПД цикла. Начальные параметры рабочего тела (воздуха):  $p_1=1$ бар;  $T_1=300$ К; степень увеличения давления в компрессоре при адиабатном процессе сжатия  $\beta=10$ ; показатель адиабаты 1,4. Температура в точке 3 не должна превышать 1000К; теплоемкость воздуха постоянная; расчет проводить на 1кг рабочего тела.
2. В цикле газовой турбины с подводом теплоты при  $v=\text{const}$  начальные параметры рабочего тела  $p_1 = 1$  бар и  $T_1 = 300$  К. Степень увеличения давления в адиабатном процессе сжатия  $\beta=10$ ;  $k=1,4$ . Температура в точке 3 не должна превышать 1000 К. Рабочее тело – воздух, теплоемкости постоянные; расчет проводить на 1кг рабочего тела.
  3. Определить температуры всех точек теоретического цикла ГТУ с подводом теплоты при  $p=\text{const}$  и цикла ГТУ с предельной регенерацией, а также КПД этих циклов, если известно, что  $t_1= 25^{\circ}\text{C}$ , степень повышения давления в компрессоре  $\beta=5$ , температура газов перед соплами турбины  $t_3 = 800^{\circ}\text{C}$ . Рабочее тело обладает свойствами воздуха, теплоемкость постоянная. Цикл 12341 идеальный, а цикл 1273481 – с предельной регенерацией.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1. Физические постоянные некоторых газов

Газ	Химическая формула	Масса 1кмоль, кг/кмоль	Газовая постоянная R, Дж/кг град	Плотность газа при н.у., кг/м <sup>3</sup>
Кислород	O <sub>2</sub>	32	259,8	1,429
Водород	H <sub>2</sub>	2,016	4124,3	0,09
Азот	N <sub>2</sub>	28,02	296,8	1,25
Окись углерода	CO	28	296,8	1,25
Воздух	-	28,96	287	1,293
Углекислый газ	CO <sub>2</sub>	44	189,9	1,977
Водяной пар	H <sub>2</sub> O	18,016	461,6	0,804
Гелий	He	4,003	2077,2	0,178
Аммиак	NH <sub>3</sub>	17,031	488,2	0,771

Таблица 2. Истинная молярная теплоемкость различных газов  
при p=const ( $\mu c_p$ , кДж/ кмоль К)

T, C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> (атм.)	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Воздух
0	29,278	29,022	28,621	29,127	35,865	38,859	33,503	29,077
100	29,881	29,106	29,131	29,265	40,211	42,418	34,060	29,269
200	30,819	29,378	29,244	29,650	43,695	45,558	34,968	29,680
300	31,836	29,816	29,303	30,258	46,522	48,238	36,040	30,270
400	32,762	30,471	29,399	30,978	48,866	50,248	37,196	30,953
500	33,553	31,137	29,563	31,711	50,822	51,714	38,411	31,644
600	34,206	31,799	29,797	32,406	52,459	52,886	39,667	32,305
700	34,751	32,414	30,103	33,030	53,833	53,766	40,956	32,904
800	35,207	32,967	30,475	33,578	54,984	54,436	42,255	33,436
900	35,558	33,461	30,873	34,060	55,960	55,022	43,519	33,907
1000	35,919	33,897	31,288	34,474	56,781	55,441	44,729	34,319
1100	36,221	34,278	31,727	34,830	57,480	55,776	45,864	34,684
1200	36,493	34,613	32,159	35,144	58,079	56,069	46,919	35,006
1300	36,756	34,906	32,594	35,417	58,594	-	47,903	35,295
1400	37,004	35,161	33,005	35,651	59,038	-	48,808	35,551
1500	37,246	35,387	33,398	35,860	59,499	-	49,645	35,777
1600	37,485	35,584	33,767	36,045	59,745	-	50,416	35,982
1700	37,720	35,764	34,118	36,208	60,030	-	51,140	36,174
1800	37,950	35,923	34,449	36,355	60,277	-	51,789	36,350
1900	38,180	36,070	34,767	36,484	60,486	-	52,384	36,514
2000	38,411	37,195	35,061	36,602	60,662	-	52,937	36,660
2100	38,641	36,313	35,337	36,710	60,935	-	53,456	36,803
2200	38,863	36,422	35,609	36,807	60,926	-	53,937	36,932
2300	39,085	36,518	35,856	36,899	61,014	-	54,377	37,058
2400	39,298	36,631	36,095	36,983	61,069	-	54,787	37,175
2500	39,508	36,694	36,321	36,058	61,094	-	55,168	37,284

Таблица 3. Средняя молярная теплоемкость различных газов при  $p = \text{const}$  ( $\mu c_p$ , кДж/кмоль К)

T, C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> (атм.)	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Воздух
0	29,278	29,022	28,621	29,127	35,865	38,859	33,503	29,077
100	29,542	29,052	28,939	29,181	38,117	40,659	33,746	29,156
200	29,935	29,135	29,077	29,307	40,065	42,334	34,123	29,303
300	30,404	29,290	29,127	29,521	41,760	43,883	34,579	29,525
400	30,882	29,504	29,109	29,793	43,255	45,223	35,094	29,793
500	31,338	29,768	29,253	30,103	44,579	46,396	35,634	30,099
600	31,765	30,048	29,320	30,429	45,759	47,359	36,200	30,408
700	32,155	30,346	29,412	30,756	46,819	48,238	36,794	30,727
800	32,506	30,639	29,521	31,074	47,769	48,950	37,397	31,032
900	32,829	30,928	29,650	31,380	48,624	49,620	38,013	31,325
1000	33,122	31,200	29,793	31,669	49,398	50,165	38,624	31,602
1100	33,390	31,459	29,948	31,941	50,106	50,667	39,231	31,866
1200	33,637	31,711	30,111	32,196	50,747	51,086	39,830	32,113
1300	33,867	31,945	30,291	32,431	51,329	-	40,412	32,347
1400	34,081	32,167	30,471	32,657	51,865	-	40,482	32,569
1500	34,286	32,376	30,651	32,862	52,355	-	41,530	32,778
1600	34,479	32,569	30,836	33,055	52,807	-	42,062	32,971
1700	34,663	32,753	31,016	33,235	53,226	-	42,581	33,155
1800	34,839	32,921	31,196	33,407	53,611	-	43,075	33,323
1900	35,010	33,084	31,376	33,566	53,967	-	43,544	33,486
2000	35,174	33,235	31,552	33,712	54,298	-	44,001	33,645
2100	35,333	33,381	31,727	33,855	54,603	-	44,399	33,792
2200	35,488	33,520	31,895	33,984	54,888	-	44,856	33,930
2300	35,638	33,645	32,062	34,110	55,152	-	45,261	34,064
2400	35,789	33,683	32,226	34,227	55,399	-	45,651	34,190
2500	35,932	33,880	32,389	34,340	55,624	-	46,023	34,311

Таблица 4. Теплоемкости некоторых газов при T = 0 C

Газ	Хим.формула	Теплоемкости				$k=c_p/c_v$	
		мольная, кДж/кмоль град		массовая, кДж/кг град			
		$\mu c_p$	$\mu c_v$	$c_p$	$c_v$		
Гелий	He	20,93	12,60	5,237	3,161	1,660	
Водород	H <sub>2</sub>	28,62	20,30	14,200	10,070	1,410	
Воздух	-	29,07	20,76	1,004	0,716	1,401	
Метан	CH <sub>4</sub>	34,74	26,42	2,165	1,647	1,315	
Аммиак	NH <sub>3</sub>	35,00	26,67	2,056	1,566	1,313	

## **Библиографический список**

### **Основная литература**

- 1.Механика. Термодинамика: учебное пособие/ В.В.Жигунов [и др.];ТулГУ, кафедра физики.-Тула: изд-во ТулГУ, 2011.-123с.  
[https://tsutula.bibliotech.ru/Reader/Book/2014062315133044835200002671.](https://tsutula.bibliotech.ru/Reader/Book/2014062315133044835200002671)
- 2.Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача: учебное пособие для вузов.-3 изд., доп.-М.: Высшая школа, 1980. – 469с.

### **Дополнительная литература**

1. Иродов И.Е. Задачи по общей физике.учебное пособие для вузов/И.Е.Иродов.-7 –е изд., стер.- СПб, М: БИНОГИ.Лаборатория знаний, 2007.-431с.
- 2.Ковалев Р.А. Техническая термодинамика. Лаб.практикум.-Тула: изд-во ТулГУ, 2010.-44с.
3. Базаров, И.П. Термодинамика : учебник для ун-тов / И.П.Базаров. 3-е изд.,перераб.и доп. М. : Высш.шк., 1983. 344с.