

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»  
«15» 01 2020 г., протокол №5

И.о.зав. кафедрой

 B.A. Никитин

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

**основной профессиональной образовательной программы  
высшего 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: 240502-01-20

Тула 2020 год

## **Разработчик методических указаний**

Евланова О.А., доцент, к.т.н.,доцент

(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)



(подпись)





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>.

















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

### Задачи

1. Воздух расширяется в процессе  $p = 0,5$  МПа = const, при этом его объем изменяется от  $0,35$  до  $1,8$  м<sup>3</sup>. Температура в конце расширения равна  $1500^\circ$  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  $p_1 = 20$  МПа и температуры  $T_1 = 20^\circ$  С до конечного давления  $p_2 = 1,6$  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  $n = 2$  кмоль, отводится количество теплоты  $3000$  кДж. Начальные параметры процесса:  $p_1 = 0,15$  МПа и  $T_1 = 227^\circ$  С; конечная температура  $127^\circ$  С. Молярная теплоемкость гелия  $\mu c_v = 12,5$  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  $1$  кг, давлением  $1,2$  МПа и температурой  $390^\circ$  С, чтобы повысить давление до  $4$  МПа? Удельная теплоемкость смеси  $c_v = 956$  Дж/кг К.
5. Азот массой  $0,5$  кг расширяется по изобаре при давлении  $0,3$  МПа так, что температура его повышается от  $100$  до  $300^\circ$  С. Найти конечный объем азота и работу изменения объема.
6. Воздух объемом  $3$  м<sup>3</sup> при температуре  $10^\circ$  С расширяется изобарно с увеличением объема в  $1,5$  раза вследствие подвода к нему  $630$  кДж теплоты. Найти давление, при котором происходит процесс расширения.
7. Объем воздуха массой  $1$  кг при температуре  $20^\circ$  С изотермически увеличен в  $1,5$  раза. Найти удельную работу изменения объема.
8. Воздух с начальным объемом  $8$  м<sup>3</sup> при давлении  $90$  кПа и температуре  $20^\circ$  С изотермически сжимается до давления  $0,8$  МПа. Найти конечный объем и работу изменения объема.





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

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







для адиабаты 3-4

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

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

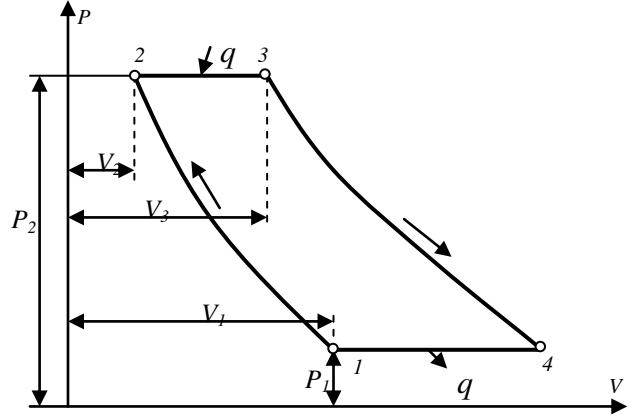


Рис.3

Работа сжатия определяется по формуле:

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

Работа расширения

$$L_2 = p_2(v_3 - v_2) + [1/(k-1)] (p_3 v_3 - p_4 v_4).$$

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:  $q_2 = c_p (T_4 - T_1)$ .



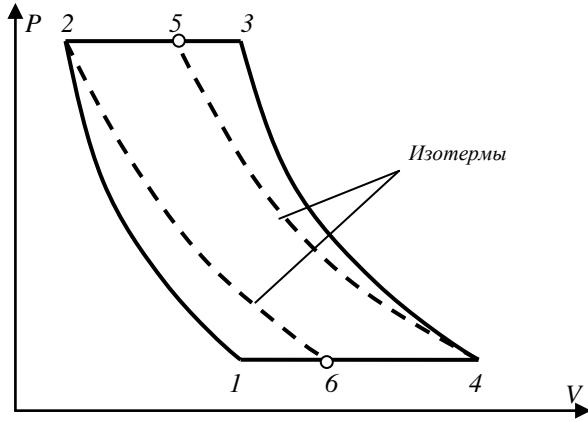


Рис.5

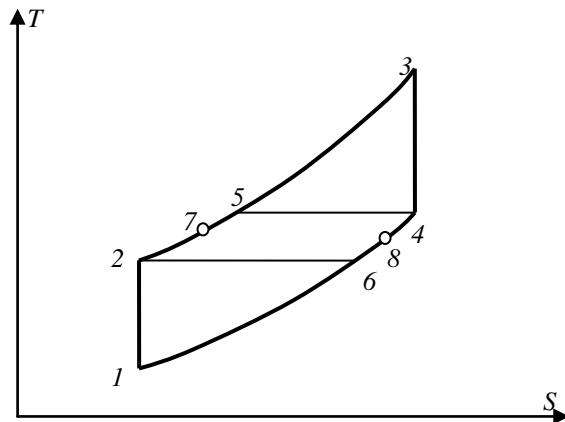


Рис.6

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:

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

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

### Задачи

- 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.





## **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>.
- 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.