

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»

Кафедра теплотехники

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ  
РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЕ**  
по учебной дисциплине

**Б3.В.3 «Техническая термодинамика и теплотехника»**

Направление подготовки:  
**240100.62 «Химическая технология»**

Профили подготовки: **Химическая технология биологически активных веществ и углеродных адсорбентов,**  
**Химическая технология целлюлозно-бумажного производства**

квалификация выпускника **«бакалавр»**

**Архангельск 2013**

## ЗАДАНИЕ №I

Расчетные данные.\* I. Состав газовой смеси, %  
по объему:

кислород ;

азот ;

углекислый газ ;

водяной пар .

2. Начальные параметры газовой смеси (первая точка цикла):

давление  $p_1$  , МПа;

температура  $t_1$  , °С.

3. Показатели процессов заданного цикла:

процесс 1-2  $n_{1-2} = \dots$  ;

процесс 2-3  $n_{2-3} = \dots$  ;

процесс 3-4  $n_{3-4} = \dots$  ;

процесс 4-1  $n_{4-1} = \dots$  .

4. Степень сжатия  $\epsilon = \frac{v_1}{v_2}$  .

5. Степень повышения давления  $\lambda = \frac{p_3}{p_2}$  .

6. Степень предварительного расширения  $\rho = \frac{v_3}{v_2}$  .

Т р е б у е т с я . I. Произвести расчет газовой смеси.

2. Определить параметры газовой смеси ( $p, v, T, s$ ) в характеристических точках цикла.

3. Определить изменение внутренней энергии, удельную работу и количество подведенной или отведенной теплоты в каждом процессе.

4. Определить термический коэффициент полезного действия заданного цикла.

5. Определить термический коэффициент полезного действия цикла Карно в температурных пределах заданного цикла и уменьшение термического к п д заданного цикла по сравнению с термическим к п д цикла Карно.

\* Варианты задания приведены в прил. I.



6. Построить заданный цикл в координатах  $p, v, T$  в выбранном масштабе и определить промежуточные точки в процессах, где это необходимо.

Расчет газовой смеси

Кажущаяся молярная масса газовой смеси, кг/моль, определяется из уравнения  $M_{см} = \sum_{i=1}^n \eta_i M_i$ ,

где  $\eta_i$  - объемная доля  $i$ -того газа;

$M_i$  - молярная масса  $i$ -того газа, кг/кмоль;

$n$  - число газов в смеси.

Удельная газовая постоянная смеси, Дж/(кг·К), определяется через кажущуюся молярную массу:

$$R_{о см} = \frac{8314}{M_{см}}$$

Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К), при постоянном давлении для газовой смеси может быть определена по формулам

$$c_p = \sum_{i=1}^n \omega_i c_{pi} \quad \text{или} \quad c_p = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_i c_{pi}}{M_{см}},$$

где  $\omega_i$  - массовая доля  $i$ -того газа;

$c_{pi}$  - удельная теплоемкость  $i$ -того газа, Дж/(кг·К), при  $p = \text{const}$ ,  $c_{pi} = \frac{c_{pi}}{M_i}$ ;

$c_{pi}$  - молярная теплоемкость  $i$ -того газа, Дж/(моль·К), при  $p = \text{const}$ .

Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К), при постоянном объеме равна

$$c_v = \sum_{i=1}^n \omega_i c_{vi} \quad \text{или} \quad c_v = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_i c_{vi}}{M_{см}}$$

где  $c_{vi}, c_{vi}$  - молярная и удельная теплоемкости при  $v = \text{const}$ .

Значения молярных теплоемкостей выбирают по таблице, не учитывая их зависимость от температуры.

Газы	$c_v$ Дж/(моль·К)	$c_p$ Дж/(моль·К)
Двухатомные	5.4,19	7.4,19
Трех-и много- атомные	7.4,19	9.4,19

Проверка правильности вычисления удельных теплоемкостей, Дж/(кг·К), проводится по уравнению Майера:  $c_p - c_v = R_o$ .

Показатель сдвизбаты  $\kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{c_p}{c_v}$ .

Удельный объем при нормальных условиях, м<sup>3</sup>/кг:

$$v_n = \frac{22.4}{M_{см}} \quad \text{или} \quad v_n = \frac{R_o T_n}{p_n},$$

где  $p_n$  - абсолютное давление,  $p_n = 101325$  Па;

$T_n$  - абсолютная температура,  $T_n = 273$  К.

Параметры газовой смеси в характеристических точках. а) Параметры первой точки:

удельный объем, м<sup>3</sup>/кг,  $v_1 = \frac{R_{о см} T_1}{p_1}$ ,

где  $T_1$  - абсолютная температура,  $T_1 = t_1 + 273$  К;

$p_1$  - абсолютное давление, Па.

б) Параметры второй точки определяются в зависимости от характера термодинамического процесса 1-2.

При изотермическом процессе ( $n = 1$ ;  $T = \text{const}$ ):

1. Удельный объем  $v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon}$ .

2. Абсолютная температура  $T_2 = T_1$ .

3. Абсолютное давление  $p_2 = p_1 \varepsilon$ .

При адиабатном процессе  $n = \kappa$ :

1. Удельный объем  $v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon}$ .

2. Абсолютная температура  $T_2 = T_1 \varepsilon^{\kappa-1}$ .

3. Абсолютное давление  $p_2 = p_1 \varepsilon^{\kappa}$ .

При проверке параметров второй точки должно выполняться равенство  $p_2 v_2 = R_{о см} T_2$ .

При политропном процессе:

1. Удельный объем  $v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon}$ .

2. Абсолютная температура  $T_2 = T_1 \varepsilon^{n-1}$ .

3. Абсолютное давление  $p_2 = p_1 \varepsilon^n$ .

в) Параметры третьей точки определяются в зависимости от характера процесса 2-3.

При изохорном процессе:

1. Удельный объем  $v_3 = v_2$ .

2. Абсолютная температура  $T_3 = T_2 \lambda$ .

3. Абсолютное давление  $p_3 = p_2 \lambda$ .



При изобарном процессе:

1. Удельный объем  $v_3 = v_2 p$ .

2. Абсолютная температура

$$T_3 = T_2 p.$$

3. Абсолютное давление

$$p_3 = p_2.$$

г) Параметры четвертой точки:

Если процесс 4-1 изохорный,  $v_4 = v_1$ .

Абсолютное давление и абсолютная температура равны:

1. При адиабатном процессе 3-4

$$\frac{p_4}{p_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^k; \quad \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{k-1}.$$

2. При политропном процессе 3-4

$$\frac{p_4}{p_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^n; \quad \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{n-1}.$$

3. При изотермическом процессе 3-4

$$\frac{p_4}{p_3} = \frac{v_3}{v_4}; \quad T_4 = T_3.$$

Если процесс 4-1 изобарный,  $p_4 = p_1$ .

Удельный объем и абсолютная температура равны:

1. При адиабатном процессе 3-4

$$\left(\frac{v_3}{v_4}\right)^k = \frac{p_4}{p_3}; \quad \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{k-1}{k}}.$$

2. При политропном процессе 3-4

$$\left(\frac{v_3}{v_4}\right)^n = \frac{p_4}{p_3}; \quad \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{n-1}{n}}.$$

3. При изотермическом процессе 3-4

$$\frac{v_3}{v_4} = \frac{p_4}{p_3}; \quad T_4 = T_3.$$

Удельную энтропию в характерных точках цикла можно определить по формуле  $s_i = c_v \ln (T_i/T_n) + R_o \ln (v_i/v_n)$ ,

где  $c_v$  — удельная теплоемкость при постоянном объеме, Дж/(кг·К);

$T_i$  — абсолютная температура в начальной точке процесса, К;

$T_n$  — абсолютная температура при нормальных условиях,  $T_n = 273\text{ К}$ ;

$R_o$  — удельная газовая постоянная, Дж/(кг·К);

$v_i$  — удельный объем в начальной точке процесса, м<sup>3</sup>/кг;

$v_n$  — удельный объем, м<sup>3</sup>/кг, при  $p_n = 101325\text{ Па}$ ;  $T_n = 273\text{ К}$ .

Изменение удельной внутренней энергии

Для всех процессов, кроме изотермического, изменение удельной внутренней энергии можно определить по формуле

$$\Delta u = c_v (T_{i+1} - T_i).$$

Для изотермического процесса  $\Delta u = 0$ .

Удельная работа газовой смеси в процессе, Дж/кг:

1. Для изотермического процесса

$$l_{i-(i+1)} = p_i v_i \cdot 2,3 \lg (v_{i+1}/v_i).$$

2. Для адиабатного процесса

$$l_{i-(i+1)} = \frac{1}{k-1} p_i v_i [1 - (p_{i+1}/p_i)^{\frac{k-1}{k}}].$$

3. Для политропного процесса

$$l_{i-(i+1)} = \frac{1}{n-1} p_i v_i [1 - (p_{i+1}/p_i)^{\frac{n-1}{n}}].$$

4. Для изобарного процесса

$$l_{i-(i+1)} = p (v_{i+1} - v_i).$$

5. Для изохорного процесса

$$l_{i-(i+1)} = 0,$$

где  $p_i, p_{i+1}$  — абсолютное давление в начальной и конечной точках процесса, Па;

$v_i, v_{i+1}$  — удельные объемы в начальной и конечной точках процесса, м<sup>3</sup>/кг.

Удельное количество теплоты, подведенное или отведенное от газовой смеси, Дж/кг:

1. Для адиабатного процесса

$$q_{i-(i+1)} = 0.$$

2. Для общего политропного процесса

$$q_{i-(i+1)} = c_v \frac{n-k}{n-1} (T_{i+1} - T_i).$$

3. Для изохорного процесса

$$q_{i-(i+1)} = c_v (T_{i+1} - T_i).$$

4. Для изобарного процесса

$$q_{i-(i+1)} = c_p (T_{i+1} - T_i).$$

5. Для изотермического процесса

$$q_{i-(i+1)} = 2,3 p_i v_i \lg (v_{i+1}/v_i).$$

Если в результате вычисления получается положительное число, то теплота подводится, а если отрицательное, то теплота отводится.

Определение термического КПД цикла

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

где  $q_1$  — удельное количество подведенной теплоты в процессах цикла, определяется как сумма удельного количества теплоты отдельных процессов.

$q_2$  — удельное отведенное количество теплоты в процессах цикла, определяется как сумма удельного количества теплоты отдельных процессов. (В формуле термического КПД  $q_2$  — абсолютная величина.)

Определение термического КПД цикла Карно для температурных пре-



делов заданного цикла  $\eta_t^k = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}}$ ,  
 где  $T_{\min}, T_{\max}$  - минимальная и максимальная абсолютные температуры ра-  
 бочего тела в заданном цикле, К.

Уменьшение термического к п д заданного цикла по сравнению  
 с термическим к п д цикла Карно определяется по формуле

$$\Delta \eta = (\eta_t^k - \eta_c^k) / \eta_c^k$$

П о с т р о е н и е ц и к л а в к о о р д и н а т а х

$p$  - абсолютное давление по оси ординат, МПа;

$v$  - удельный объем по оси абсцисс, м<sup>3</sup>/кг.

Для определения промежуточных точек необходимо при общем по-  
 литропном процессе принять значение удельного объема  $v_x$  в преде-  
 лах значений начальной и конечной точек процесса. Из уравнения  
 $p_1 v_1^n = p_x v_x^n$  определить давление для принятой промежуточ-  
 ной точки:

$$p_x = p_1 (v_1 / v_x)^n$$

Для изохорного и изобарного процессов промежуточные точки опреде-  
 лять нет необходимости.

П о с т р о е н и е ц и к л а в к о о р д и н а т а х

$T$  - абсолютная температура по оси ординат, К ;

$s$  - удельная энтропия по оси абсцисс, Дж/(кг·К).

Для определения промежуточных точек необходимо:

1. Принять значение абсолютной температуры  $T_x$  в пределах  
 значений начальной и конечной точек процесса.

2. Определить значение удельного объема для принятой точки:  
 для общего политропного процесса

$$\frac{v_x}{v_1} = \left( \frac{T_1}{T_x} \right)^{\frac{1}{n-1}};$$

для изохорного процесса

$$v_1 = v_x = v_{i+1};$$

для изобарного процесса

$$T_1 / T_x = v_1 / v_x$$

3. Определить значение удельной энтропии, Дж/(кг·К), для при-  
 нятой промежуточной точки по формуле

$$s_x = 2,3 c_v \lg \frac{T_x}{T_1} + R_{осм} \cdot 2,3 \lg \frac{v_x}{v_1},$$

где  $c_v$  - удельная теплоемкость при постоянном объеме, Дж/(кг·К).