

Учебный курс
«Термодинамика и теплопередача»
(Практическое занятие 1)

Для студентов по направлению подготовки
131000 Нефтегазовое дело
(квалификация (степень) «бакалавр»)

Преподаватель: д.т.н., профессор *Уразбахтин Фёдор Асхатович*

Контрольная работа 1.

Задача 1.

1. Определить характеристики термодинамического процесса:

- а) универсальную газовую постоянную смеси газов;
- б) показатель политропы;
- в) теплоту термодинамического процесса;
- г) изменение внутренней энергии;
- д) изменение энтальпии;
- е) работу, совершенную газом.

2. Изобразить процесс сжатия на диаграммах:

а) $p-V$; б) $T-S$

Принимаемые допущения:

- 1) температурной зависимостью теплоемкости можно пренебречь;
- 2) смесь считается идеальным двухатомным газом;
- 3) Вычисление энергетических характеристик процесса выполнить по первому закону термодинамики.

Контрольная работа 1.

Задача 1.

Исходные данные:

- 1) Газовая смесь состоит из газов:
 - а) водорода H_2 с массовой долей $m_1 = 0,04$
 - б) азота N_2 с массовой долей $m_2 = 0,30$
 - в) кислорода O_2 с массовой долей $m_3 = 0,66$

- 2) Начальная плотность смеси $\rho = 0,9 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

- 3) Сжатие происходит от давления $p_H = 0,10 \text{ МПа}$
до давления $p_K = 290,00 \text{ МПа}$

- 4) Масса газовой смеси $m = 1,8 \text{ кг}$

- 5) В момент окончания сжатия температура достигает значения $T_K = 40^\circ \text{C}$

Контрольная работа 1.

Решение задачи 1.

1. **Универсальная газовая постоянная** численно равна работе расширения одного моля газовой смеси в изобарном процессе при увеличении температуры на 1°К.

Расчетная формула:
$$R_{см} = \frac{8314}{\mu_{см}}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$$

где $\mu_{см}$ - масса 1 кмоля газа, кг (численно равна молекулярной массе газовой смеси).

Имеем а)
$$\mu_{см} = \sum_{i=1}^3 r_i \cdot \mu_i; \quad б) \quad \mu_{см} = \frac{1}{\sum_{i=1}^3 \frac{m_i}{\mu_i}}$$

где μ_i молекулярная масса i -го компонента газа;

r_i - объемная доля i -го компонента; m_i - массовая доля i -го компонента

Контрольная работа 1.

Решение задачи 1.

Воспользуемся формулой б).

Определяем молекулярные массы компонентов в газовой

смеси: $\mu_i = x_i \cdot A_i$, где x_i - количество атомов в

молекуле; A_i - атомный вес i -го компонента в смеси

газов. Для задачи имеем:

для газа - водород - H_2 $\mu_1 = 2 \cdot 1 = 2$ $x_1 = 2$ $A_1 = 2$

для газа - азот - N_2 $x_2 = 2$ $A_2 = 14$

для газа - кислород - O_2 $x_3 = 2$ $A_3 = 16$

Имеем: $\mu_1 = 2 \cdot 1 = 2$ $\mu_2 = 2 \cdot 14 = 28$ $\mu_3 = 2 \cdot 16 = 32$

Из условия задачи имеем: $m_1 = 0,04$; $m_2 = 0,30$; $m_3 = 0,66$

Контрольная работа 1.

Решение задачи 1.

Масса 1 кмолья газа $\mu_{см} = \frac{1}{\sum_{i=1}^3 \frac{m_i}{\mu_i}} = \frac{1}{\frac{0,04}{2} + \frac{0,30}{28} + \frac{0,66}{32}} = 19,4930 \text{ кг}$

Универсальная газовая постоянная равна

$$R_{см} = \frac{8314}{\mu_{см}} = \frac{8314}{19,4930} = 426,5121, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$$

Показатель политропы – это показатель в уравнении политропного процесса $pV^n = const$

Связь между основными параметрами рабочего тела в политропном процессе выражается **следующими формулами:**

$$a) \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n \quad б) \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} \quad в) \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

Контрольная работа 1.

Решение задачи 1.

Для определения показателя политропы n воспользуемся последней формулой

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

Параметры начала термодинамического процесса:

Давление: $p_1 = p_H = 0,10 \text{ МПа}$

Температура находится из уравнения состояния: $p_1 V_1 = R_{cm} T_1$, откуда

$$T_1 = \frac{p_1 V_1}{R_{cm}}$$

Имеем: $R_{cm} = 426,5121, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$ $V_1 = \frac{m}{\rho} = \frac{1,8}{0,9} = 2,0 \text{ м}^3$

Откуда $T_1 = \frac{p_1 V_1}{R_{cm}} = \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot 2,0}{426,5121} = 468,9199 \text{ K}$

Контрольная работа 1.

Решение задачи 1.

Параметры конца термодинамического процесса:

Давление: $p_2 = p_K = 290,00 \text{ МПа}$

Температура: $T_2 = T_K + 273,15 = 40 + 273,15 = 313,15 \text{ К}$

Таким образом, имеем
$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \Rightarrow \frac{313,15}{468,92} = \left(\frac{290,0}{0,1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

Откуда показатель политропы получается $n=0,9518$

Количество теплоты, используемое в процессе с газом определяется выражением

$$Q = m \cdot (\mu C_m) \cdot (T_2 - T_1)$$

где μC_m - средняя молярная теплоемкость смеси газов в пределах температур от $T_1 = T_H$ до $T_2 = T_K$

Контрольная работа 1.

Решение задачи 1.

Определение средней мольной теплоемкости смеси газов

$$\mu C_m = \sum_{i=1}^3 r_i (\mu C_{mi}),$$

где r_i – объемная доля i -го газа в смеси; μC_{mi} – средняя мольная теплоемкость i -го газа в смеси.

Имеем $r_i = m_i \frac{\mu_{см}}{\mu_i}$. В нашем случае:

$$\text{Для газа – водород } m_1 = 0,04; \quad \mu_1 = 2; \quad r_1 = 0,04 \frac{19,9930}{2} = 0,3898$$

$$\text{Для газа – азот } m_2 = 0,30; \quad \mu_2 = 28; \quad r_2 = 0,30 \frac{19,9930}{28} = 0,2082$$

$$\text{Для газа – кислород } m_3 = 0,66; \quad \mu_3 = 32; \quad r_3 = 0,66 \frac{19,9930}{32} = 0,4020$$

Контрольная работа 1.

Решение задачи 1.

Определение средней мольной теплоемкости для газов в смеси осуществляем по таблице. Входными параметрами являются: температура в конце процесса (в град) и состав газа. При необходимости проводится интерполяция.

1. Средние изобарные мольные теплоемкости некоторых газов, кДж/(кмоль·К)
в интервале температур 0- t .

$t, ^\circ\text{C}$	Воздух	Кислород O_2	Азот N_2	Водород H_2	Водяной пар H_2O	Оксид углерода CO	Углекислый газ CO_2
0	29,07	29,27	29,11	28,62	33,30	29,12	35,86
100	29,15	29,54	29,14	28,93	33,74	29,18	38,11
200	29,30	29,93	29,22	29,07	34,19	29,30	40,07
300	29,52	30,40	29,38	29,12	34,57	29,52	41,75
400	29,74	30,87	29,60	29,18	35,09	29,79	43,25
500	30,09	31,33	29,86	29,25	35,63	30,10	44,57
600	30,40	31,76	30,15	29,32	36,19	30,43	45,75
700	30,72	32,15	30,45	29,41	36,79	30,75	46,81
800	31,02	32,50	30,75	29,52	37,39	31,07	47,76
900	31,32	32,82	31,04	29,62	38,00	31,38	48,61
1000	31,59	33,11	31,31	29,73	38,62	31,66	49,39
1200	32,11	33,63	31,82	30,11	39,82	32,19	50,74
1400	32,56	34,08	32,29	30,47	40,98	32,65	51,85
1600	32,97	34,47	32,79	30,83	42,06	33,05	52,80
1800	33,32	34,83	33,05	31,19	43,07	33,40	53,60
2000	33,64	35,17	33,37	31,54	43,99	33,71	54,29

Контрольная работа 1.

Решение задачи 1.

В нашем случае: температура

$$t_1 = T_1 - 273,15 = 468,93 - 273,15 = 195,77 \text{ }^\circ\text{C}$$

Средняя молярная теплоемкость газа в пределах до температуры $t_1 = 195,77 \text{ }^\circ\text{C}$ имеем:

$$\text{Для газа – водород: } \mu C_1 = 29,8605$$

$$\text{Для газа – азот: } \mu C_2 = 29,2177$$

$$\text{Для газа – кислород: } \mu C_3 = 29,9160$$

Средняя молярная теплоемкость смеси газов составляет:

$$\mu C_m = \sum_{i=1}^3 r_i (\mu C_{mi}) = 0,3898 \cdot 29,8605 + 0,2082 \cdot 29,2177 + 0,4020 \cdot 29,9160 =$$

$$= 29,7489 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{K}}$$

Количество теплоты, используемое в процессе с газом, составляет

$$Q = m \cdot (\mu C_m) \cdot (T_2 - T_1) = 1,8 \cdot 29,7489 (313,15 - 468,93) =$$
$$= -8341,7106 \text{ кДж}$$

Контрольная работа 1.

Решение задачи 1.

Изменение внутренней энергии определяется выражением

$$u = u_2 - u_1 = m \cdot c_V \cdot (T_2 - T_1)$$

где c_V - массовая теплоемкость при постоянном объеме

Поскольку в задаче процесс происходит при постоянном объеме,

то имеем

$$c_V = \frac{\mu C_m}{\mu_{cm}} = \frac{29,7489}{19,9930} = 1,4880 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$$

Откуда, изменение внутренней энергии составит

$$\begin{aligned} u &= m \cdot c_V \cdot (T_2 - T_1) = \\ &= 1,8 \cdot 1,4880 \cdot (313,15 - 468,93) = -417,2412 \text{кДж} \end{aligned}$$

Контрольная работа 1.

Решение задачи 1.

Изменение энтальпии определяется выражением

$$i = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1)$$

где c_p - массовая теплоемкость при постоянном давлении

Теплоемкости и связаны между собой соотношениями

$$c_p - c_V = R_{см} - \text{уравнение Майера}$$

$$k = \frac{c_p}{c_V} - \text{показатель адиабаты}$$

$$\text{Из них имеем: } k = 1 + \frac{R_{см}}{c_V} = 1 + \frac{426,5121}{1,4880 \cdot 1000} = 1,2866$$

$$c_p = k \cdot c_V = 1,2866 \cdot 1,4880 = 1,9145 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$$

Изменение энтальпии составляет:

$$i = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) = 1,8 \cdot 1,9145 \cdot (313,15 - 468,92) = -536,7990 \text{кДж}$$

Контрольная работа 1.

Решение задачи 1.

Работа, совершаемая газом в политропном процессе, определяется выражением:

$$l = m \cdot l_0 = -m \frac{R_{cm}}{n-1} \left[1 - \left(\frac{p_k}{p_H} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

В нашем случае имеем

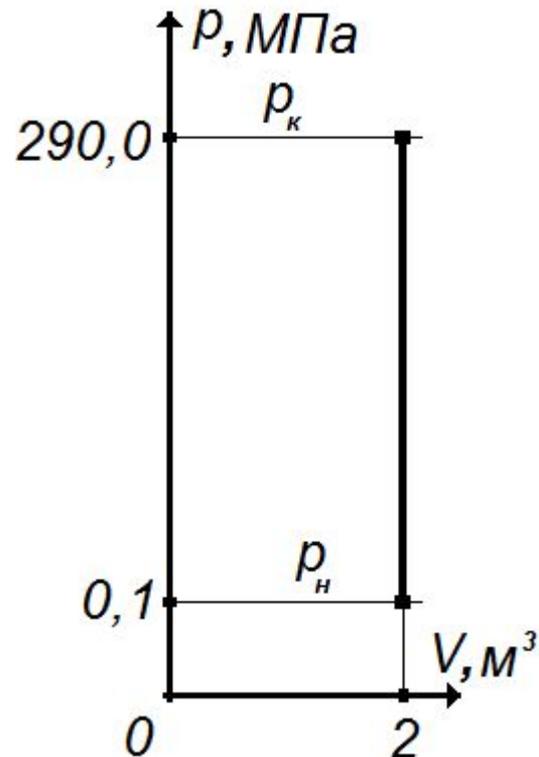
$$\begin{aligned} l = m \cdot l_0 &= -m \frac{R_{cm}}{n-1} \left[1 - \left(\frac{p_k}{p_H} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] = \\ &= -1,8 \frac{426,5121}{0,9518-1} \left[1 - \left(\frac{290,0}{0,1} \right)^{\frac{0,9518-1}{0,9518}} \right] = 5288,042 \text{ Дж} \end{aligned}$$

Контрольная работа 1.

Решение задачи 1.

2. Изображение процесса сжатия на диаграммах:

а) p - V – процесс изохорный (при постоянном объеме)



Контрольная работа 1.

Решение задачи 1.

б) для изохорного процесса имеем:

$$S_2 - S_1 = c_V \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$$

В нашем случае:

$$S = S_1 + c_V \ln\left(\frac{T}{T_1}\right) = S_1 + 1,4880 \cdot \ln\left(\frac{T}{468,92}\right)$$

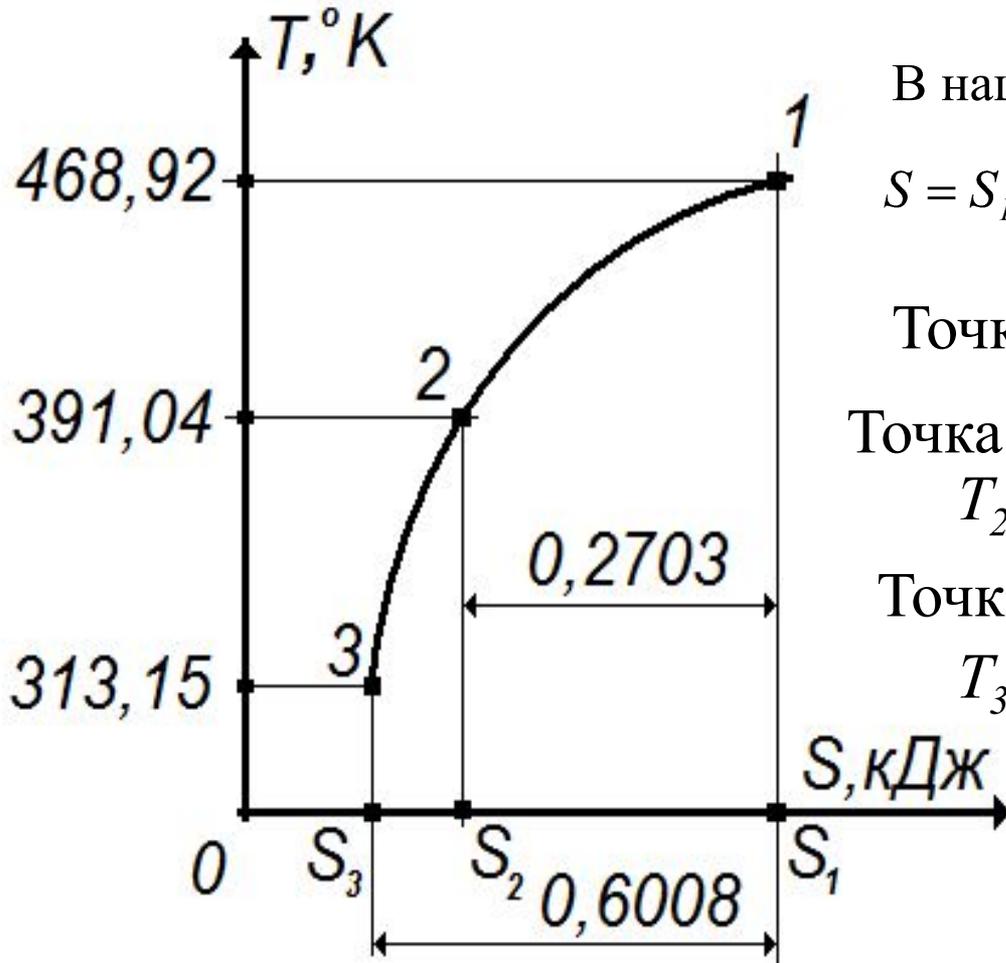
Точка 1: $T_1 = 468,92^\circ \text{K}$; S_1

Точка 2:

$$T_2 = 313,15^\circ \text{K}; \quad S_2 = S_1 - 0,6008$$

Точка 3:

$$T_3 = 391,04^\circ \text{K}; \quad S_3 = S_1 - 0,2703$$



Контрольная работа 1.

Итоги решения задачи 1.

Универсальная газовая постоянная

$$R_{cm} = 426,5121, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$$

Показатель политропы $n=0,9518$

Количество теплоты $Q = -8341,7106 \text{ кДж}$

Изменение внутренней энергии $u = -417,2412 \text{ кДж}$

Изменение энтальпии $i = -536,7990 \text{ кДж}$

Работа, совершаемая газом в политропном процессе

$$l = 5288,042 \text{ Дж}$$