
Теоретические Основы теплотехники

лектор

Зиякаев Григорий Ракитович

Лекция 2

Содержание

- Теплостойкость
- Калорические параметры
- Процессы идеального газа

Теплоемкость

Теплоемкость- количество теплоты, необходимое для нагрева тела на 1 градус

$c, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ -массовая удельная теплоемкость

$c', \frac{\text{Дж}}{\text{нм}^3 \cdot \text{К}}$ -объемная удельная теплоемкость
(при н.у. $p=760$ мм.рт.ст., $t=0$ °С)

$\mu c, \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$ -молярная теплоемкость

Теплоемкость

$$c = \frac{\mu c}{\mu},$$

$$c' = \frac{\mu c}{22.4},$$

$$c' = c \cdot \rho,$$

Теплоемкость

Теплоемкость **идеальных** газов зависит от температуры

$$c = f(T),$$

Теплоемкость **реальных** газов зависит от температуры и давления

$$c = f(T, p),$$

Теплоемкость

Расчетные формулы для удельной теплоты произвольного процесса:

$$q = c_m (t_2 - t_1), \quad \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot ^\circ\text{C} = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right]$$

где c_m — средняя теплоемкость в данном интервале температур

Теплоемкость в бесконечно малом интервале температур (т.е. при данной температуре) называется **истинной**

$$c = \frac{dq}{dT},$$

Теплоемкость

Т.к. теплоемкость является функцией температуры, то истинное значение ее определяется по формуле:

$$c = c_o + a \cdot t + b \cdot t^2 + c \cdot t^3$$

где a, b, c – постоянные коэффициенты для газа

Для технических расчетов пользуются линейной зависимостью

$$c = c_o + a \cdot t$$

Для средней теплоемкости в пределах температур t_1 и t_2

$$c_m = c_o + \frac{a}{2} \cdot (t_1 + t_2)$$

Теплоемкость

Теплоемкость зависит от характера процесса подвода теплоты:

- В изохорном процессе – изохорная теплоемкость (c_v)
- В изобарном – изобарная теплоемкость (c_p)
- В изотермическом $c = \infty$
- В адиабатном $c = 0$
- В политропном c_n

Значения истинных теплоемкостей для
технически важных газов приведены в
справочниках

Теплоемкость

Связь между изохорной и изобарной теплоемкостями характеризуется законом Майера:

$$c_p - c_v = R, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$\mu c_p - \mu c_v = R_\mu = 8314, \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$$

Теплоемкость

Приближенные значения теплоемкости

$$\mu C_p = 20,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} \quad - \text{одноатомные газы}$$

$$\mu C_p = 29,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} \quad - \text{двухатомные газы}$$

$$\mu C_p = 37,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} \quad - \text{трех- и многоатомные газы}$$

Теплоемкость

Приближенные значения теплоемкости

$$\mu C_p = 20,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} \quad - \text{одноатомные газы}$$

$$\mu C_p = 29,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} \quad - \text{двухатомные газы}$$

$$\mu C_p = 37,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} \quad - \text{трех- и многоатомные газы}$$

Задача 1

Найти массовую и объемную теплоемкости кислорода при постоянном объеме и давлении, считая $c = \text{const}$

Теплоемкость

Задача 2

Найти значение истинной мольной теплоемкости азота при постоянном давлении для температуры 800 °С

Задача 3

Вычислить среднюю массовую теплоемкость воздуха при постоянном давлении в пределах 200- 500 °С

Интерполяционные формулы для истинных и средних мольных теплоемкостей газов

Газ	Истинная мольная теплоемкость при $p = \text{const}$ $c_{p\mu}$, кДж/(кмоль · град)	Средняя мольная теплоемкость при $p = \text{const}$ $\overline{c_{p\mu}}_0^t$, кДж/(кмоль · град)
В пределах от 0 до 1000 °С		
O ₂	29,5802+0,0069706·t	29,2080+0,0040717·t
N ₂	28,5372+0,0053905·t	28,7340+0,0023488·t
CO	28,7395+0,0058862·t	28,8563+0,0026808·t
Воздух	28,7558+0,0057208·t	28,8270+0,0027080·t
H ₂ O	32,8367+0,0116611·t	33,1494+0,0052749·t
SO ₂	42,8728+0,0132043·t	40,4386+0,0099562·t
В пределах от 0 до 1500 °С		
H ₂	28,3446+0,0031518·t	28,7210+0,0012008·t
CO ₂	41,3597+0,0144985·t	38,3955+0,0105838·t

Теплоемкость

Теплоемкость газовых смесей:

$$c = \sum_{i=1}^n c_i \cdot g_i, \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right]$$

$$c' = \sum_{i=1}^n c_i \cdot r_i, \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}} \right]$$

$$\mu c = \sum_{i=1}^n \mu c_i \cdot r_i, \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} \right]$$

Теплоемкость

Задача 4

Найти массовую теплоемкость газовой смеси при постоянном объеме и давлении, считая $c = \text{const}$

Последняя цифра шифра	Состав смеси
0	2 кг O_2 + 8 кг N_2
1	5 кг CO_2 + 5 кг CO
2	3 кг CO + 7 кг O_2
3	6 кг N_2 + 4 кг CO_2
4	5 кг H_2O + 5 кг CO_2
5	2 кг N_2 + 8 кг H_2
6	4 кг CO + 6 кг H_2
7	2 кг CO_2 + 8 кг CO
8	1 кг H_2 + 9 кг N_2
9	5 кг N_2 + 5 кг CO_2

Калорические параметры

Внутренняя энергия

Внутреннюю энергию газа составляет сумма внутренней кинематической и внутренней потенциальной энергии.

В идеальных газах силы взаимодействия между молекулами отсутствуют и поэтому внутренняя энергия идеального газа равно внутренней кинетической энергии, и зависит только от температуры. Внутренняя энергия характеризует состояние газа, т.е. является параметром состояния.

$$u, \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right]$$

Калорические параметры

Энтальпия

Во многих тепловых расчетах используется величина h , называемая энтальпией, которая определяется из выражения:

$$h = u + p \cdot v, \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right]$$

Энтропия

Энтропия (от др.-греч. $\epsilon\nu$ — «в» и $\tau\rho\omicron\iota\alpha$ — «поворот», «превращение») — широко используемый в естественных и точных науках термин. Впервые введён в рамках термодинамики как функция состояния термодинамической системы, определяющая меру необратимого рассеивания энергии.

$$S, \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}} \right]$$

Калорические параметры

Энтальпия

Во многих тепловых расчетах используется величина h , называемая энтальпией, которая определяется из выражения:

$$h = u + p \cdot v, \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right]$$

Энтропия

Энтро́пия (от др.-греч. $\epsilon\nu$ — «в» и $\tau\rho\omicron\iota\alpha$ — «поворот», «превращение») — широко используемый в естественных и точных науках термин. Впервые введён в рамках термодинамики как функция состояния термодинамической системы, определяющая меру необратимого рассеивания энергии.

$$s, \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}} \right]$$

Калорические параметры

Энтропия идеального газа является функцией состояния $s = f(p, T)$ и рассчитывается по формуле

$$s = s^0 - R \cdot \ln \left(\frac{p}{p_0} \right),$$

где $p_0 = 1$ бар ,

s^0 – табличные значения для различных газов

Калорические параметры

Изменения калорических параметров рассчитываются через табличные значения по формулам

$$\Delta u = u_2 - u_1 \quad \Delta h = h_2 - h_1 \quad \Delta s = s_2^0 - s_1^0 - R \cdot \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

Или через теплоемкости

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

$$\Delta h = c_p (T_2 - T_1)$$

$$\Delta s = c_p \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R \cdot \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

Газовые процессы

Изобарный $p = \text{const}$

Связи параметров: $\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1}$

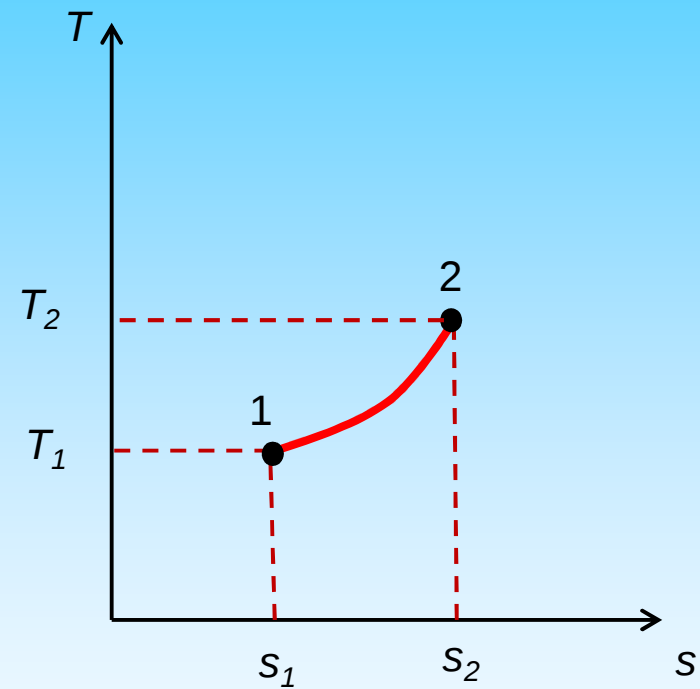
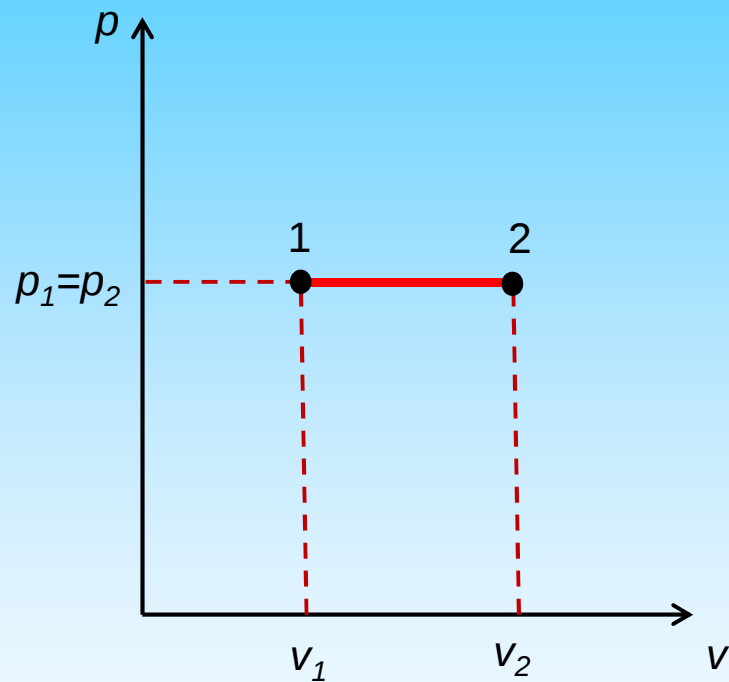
Работа изменения объема: $\omega = p \cdot (v_2 - v_1), \left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right]$

Внешняя работа: $l = 0, \left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right]$

Теплота: $q = \Delta h = c_p \cdot (t_2 - t_1), \left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right]$

Изменение энтропии: $\Delta s = c_p \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)$

Газовые процессы



Газовые процессы

Изохорный $v = \text{const}$

Связи параметров: $\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}$

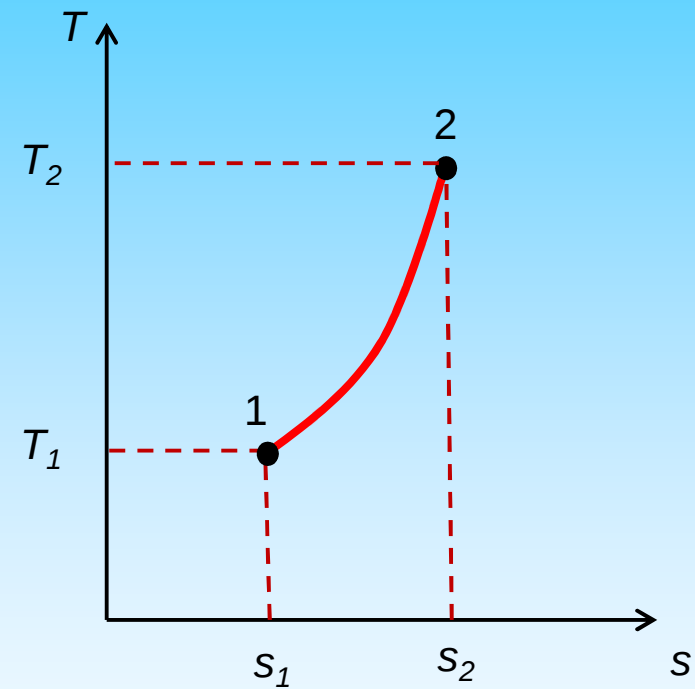
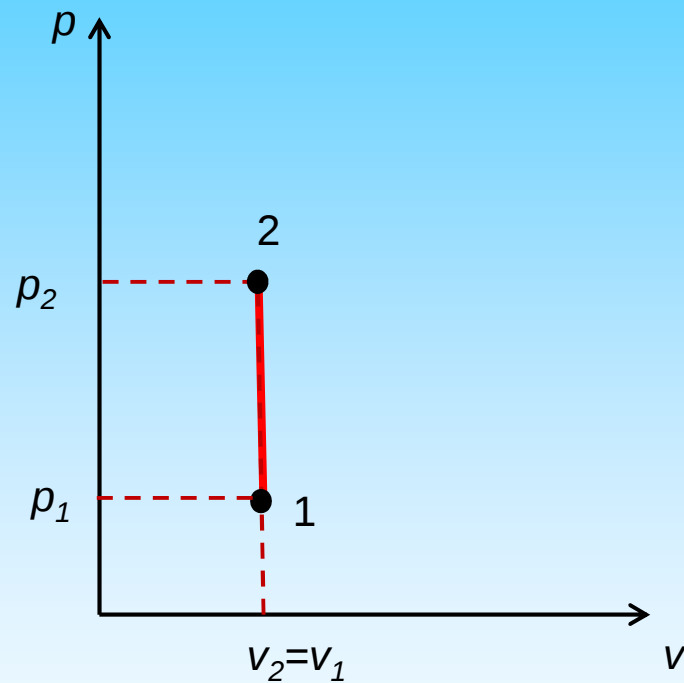
Работа изменения объема: $\omega = 0$

Внешняя работа: $l = v \cdot (p_1 - p_2)$

Теплота: $q = \Delta u = c_v \cdot (t_2 - t_1)$

Изменение энтропии: $\Delta s = c_p \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R \cdot \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$

Газовые процессы



Газовые процессы

Изотермический $t = \text{const}$

Связи параметров: $\frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1}{v_2}$

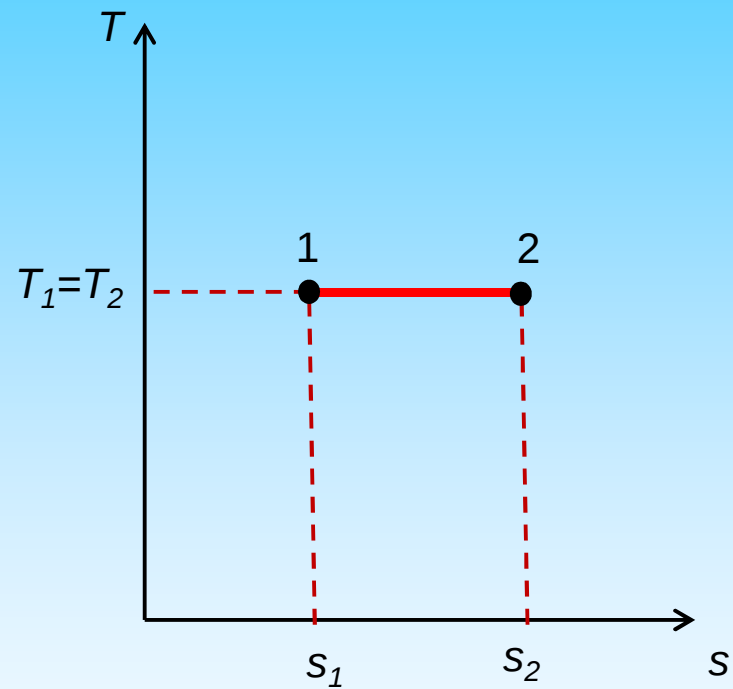
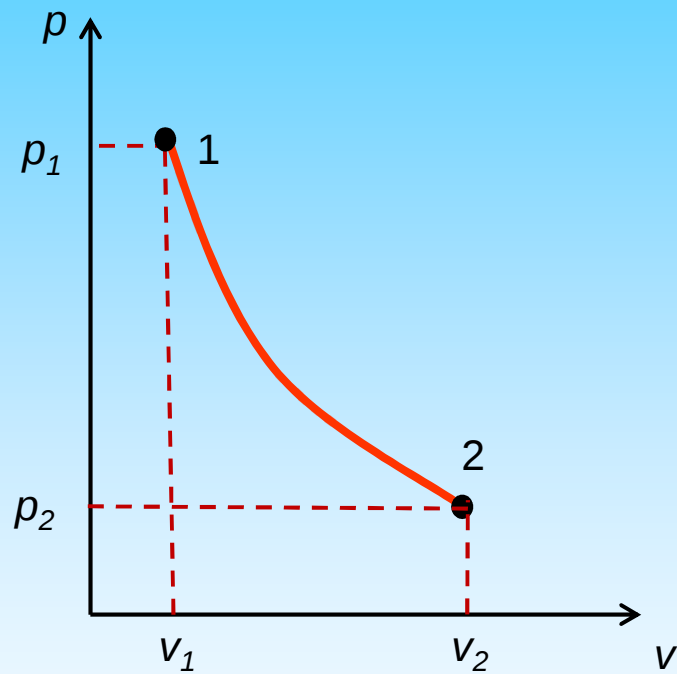
Работа изменения объема: $\omega = R \cdot T \cdot \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right)$

Внешняя работа: $l = R \cdot T \cdot \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right)$

Теплота: $q = R \cdot T \cdot \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right)$

Изменение энтропии: $\Delta s = -R \cdot \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$

Газовые процессы



Газовые процессы

Адиабатный (без теплообмена с окружающей средой)

$$p \cdot v^k = \text{const}$$

Связи параметров: $\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}$

$$k = \frac{c_p}{c_v} = \frac{\mu c_p}{\mu c_v}$$

$k = 1,67$ - одноатомные газы

$k = 1,4$ - двухатомные газы

$k = 1,29$ - трех- и многоатомные газы

Газовые процессы

Работа изменения объема:

$$\omega = \frac{1}{k-1} R (T_1 - T_2)$$

Внешняя работа:

$$l = k \cdot \omega$$

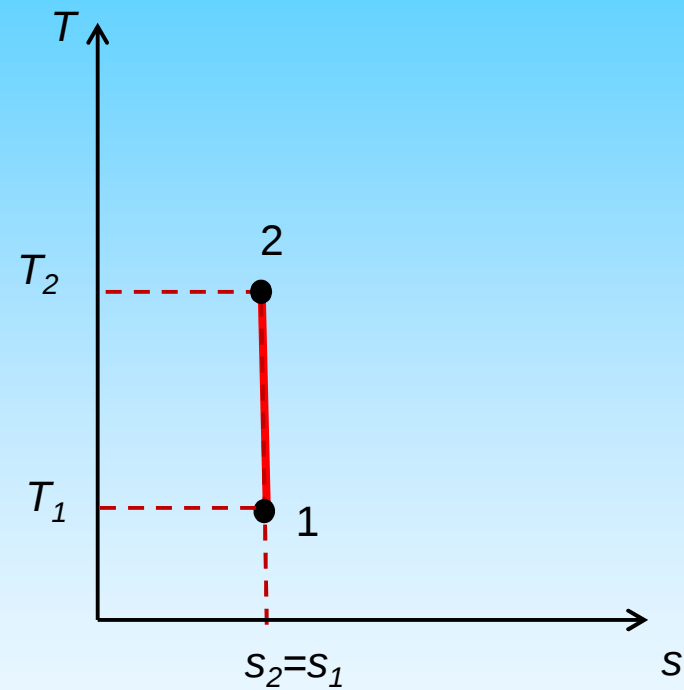
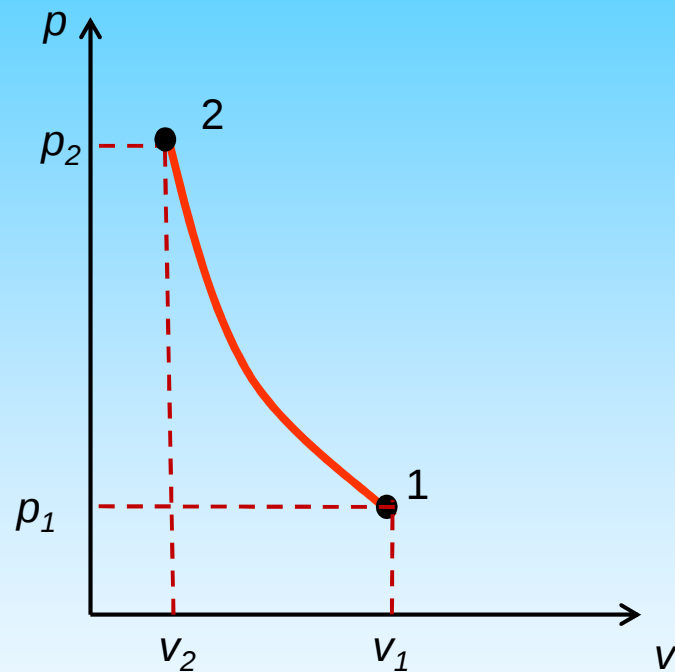
Теплота:

$$q = 0$$

Изменение энтропии:

$$\Delta s = 0$$

Газовые процессы



Газовые процессы

Политропный $p \cdot v^n = \text{const}$

$n=0$ – изобарный процесс

$n=1$ – изотермический процесс

$n=k$ – адиабатный процесс

$n=\infty$ – изохорный процесс

Связи параметров: $\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n$ $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$ $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1}$

Газовые процессы

Работа изменения объема:

$$\omega = \frac{1}{n-1} R (T_1 - T_2)$$

Внешняя работа:

$$l = n \cdot \omega$$

Теплота:

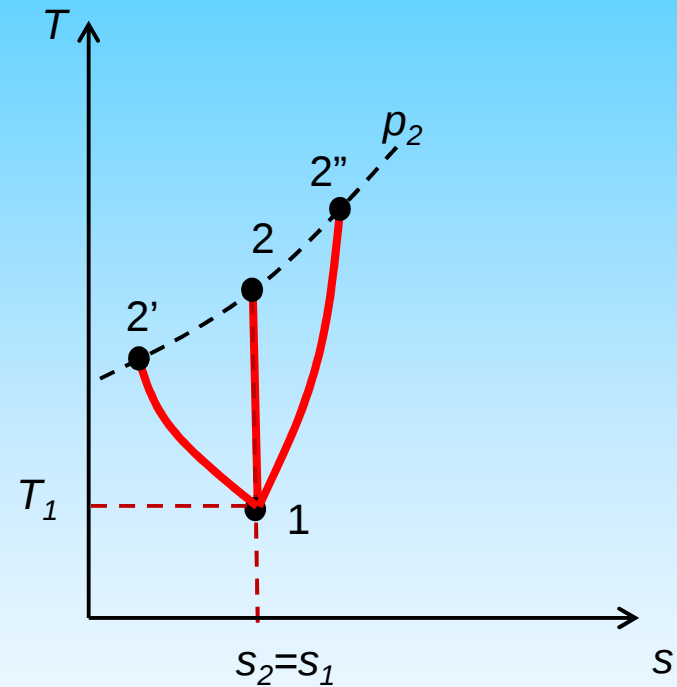
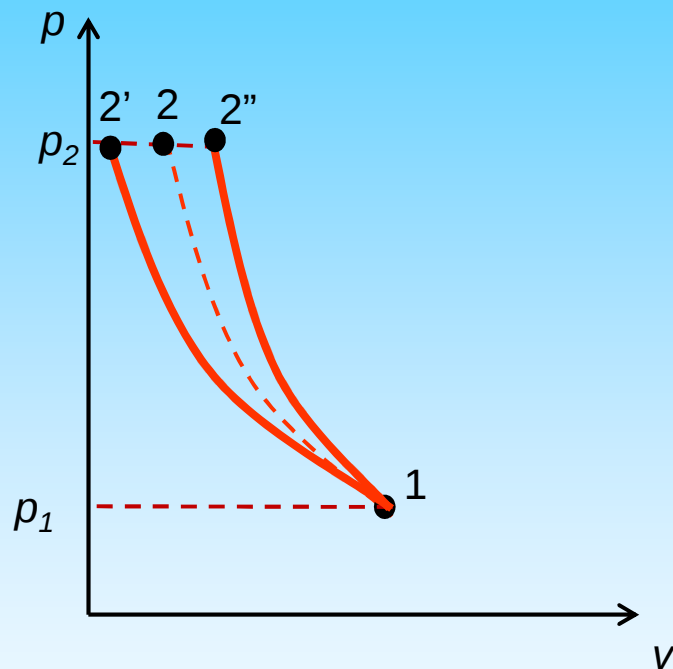
$$q = c_n (T_2 - T_1)$$

$$c_n = c_v \frac{n-k}{n-1}$$

Изменение энтропии:

$$\Delta s = c_p \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R \cdot \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

Газовые процессы



1-2' – политропное сжатие $1 < n < k$

1-2'' – политропное сжатие $n > k$

Для процесса изменения состояния идеального газа 1-2 рассчитать:

- термические параметры p, v, T в начальном и конечном состояниях;
- изменение калорических параметров $\Delta u, \Delta h, \Delta s$;
- теплоту (q) и работу процесса (w, ℓ).

Исходные данные для расчета приведены в табл. 1 по вариантам.

Для двух-, трех- и многоатомных газов теплоемкость принять постоянной: для воздуха и азота (N_2) $\mu_{с,г}=20,8$ кДж/кмоль·К, для углекислого газа (CO_2) и метана (CH_4) $\mu_{с,г}=29,1$ кДж/кмоль·К.

Результаты расчета представить в виде табл. 2 и 3. Показать процессы в p - v - и T - s -диаграммах.

№ вар	Газ	μ кг/кмоль	Процесс	Параметры	
1	воз- дух	29	изобар- ный	$p=2$ бар, $t_1=30^\circ\text{C}$,	$t_2=160^\circ\text{C}$
2	CO_2	44	изохор- ный	$p_1=5$ бар, $v=0,111$ м ³ /кг,	$t_2=180^\circ\text{C}$
3	He	4	политр. $n=1,3$	$p_1=10$ бар, $t_1=10^\circ\text{C}$,	$p_2=30$ бар
4	CH_4	16	изотерм.	$p_1=1$ бар, $v_1=1,834$ м ³ /кг,	$p_2=20$ бар
5	N_2	28	адиа- батный	$v_1=0,32$ м ³ /кг, $p_1=3$ бар,	$p_2=18$ бар
6	воз- дух	29	изобар- ный	$v_1=0,434$ м ³ /кг, $p=2$ бар, $v_2=0,621$ м ³ /кг	
7	CO_2	44	изохор- ный	$p_1=5$ бар, $t_1=20^\circ\text{C}$,	$p_2=7,1$ бар
8	He	4	политр. $n=1,75$	$v_1=0,588$ м ³ /кг, $t_1=10^\circ\text{C}$,	$v_2=0,314$ м ³ /кг
9	CH_4	16	изотерм.	$p_1=1$ бар, $t=80^\circ\text{C}$,	$p_2=20$ бар
10	N_2	28	адиа- батный	$t_1=50^\circ\text{C}$,	$p_1=3$ бар, $t_2=265,9^\circ\text{C}$
11	воз- дух	29	изобар- ный	$t_1=160^\circ\text{C}$,	$p=2$ бар, $v_2=0,434$ м ³ /кг
12	CO_2	44	изохор- ный	$t_1=20^\circ\text{C}$, $v=0,111$ м ³ /кг,	$p_2=7,1$ бар
13	He	4	политр. $n=0,8$	$p_1=10$ бар, $t_1=10^\circ\text{C}$,	$p_2=30$ бар
14	CH_4	16	изотерм.	$v_1=1,834$ м ³ /кг, $t=80^\circ\text{C}$,	$v_2=0,0917$ м ³ /кг
15	N_2	28	адиа- батный	$v_1=0,32$ м ³ /кг, $t_1=50^\circ\text{C}$,	$t_2=265,9^\circ\text{C}$

Газовые смеси

Расчет параметров и процессов смеси идеальных газов

Смесь газов с начальной температурой $T_1 = 300$ К сжимается от давления $p_1 = 0,1$ МПа до давления p_2 . Сжатие может происходить по изотерме, по адиабате и по политропе с показателем политропы n .

Определить для каждого из трех процессов сжатия конечную температуру T_2 и объем v_2 смеси, изменение внутренней энергии ΔU , энтальпии ΔH и энтропии смеси ΔS , а также теплоту Q и работу L . Результаты расчетов занести в таблицу 2 и изобразить процессы сжатия в $p-v$ и $T-s$ – диаграммах. Данные, необходимые для решения задачи, выбрать из таблицы 1. Примечание: расчет провести приняв теплоемкость постоянной.

Последняя цифра шифра	Состав смеси	n	Предпоследняя цифра шифра	p_2 , МПа
0	2 кг O_2 + 8 кг N_2	1,25	0	0,9
1	5 кг CO_2 + 5 кг CO	1,3	1	1,0
2	3 кг CO + 7 кг O_2	1,4	2	0,85
3	6 кг N_2 + 4 кг CO_2	1,5	3	0,8
4	5 кг H_2O + 5 кг CO_2	1,4	4	0,95
5	2 кг N_2 + 8 кг H_2	1,3	5	0,9
6	4 кг CO + 6 кг H_2	1,2	6	0,85
7	2 кг CO_2 + 8 кг CO	1,1	7	0,9
8	1 кг H_2 + 9 кг N_2	0,9	8	0,8
9	5 кг N_2 + 5 кг CO_2	0,8	9	0,7

Процессы	V_2 м ³	T_2 К	ΔU кДж	ΔH кДж	ΔS кДж/К	Q кДж	L кДж
Изотермический							
адиабатный $k =$							
Политропный $n =$							