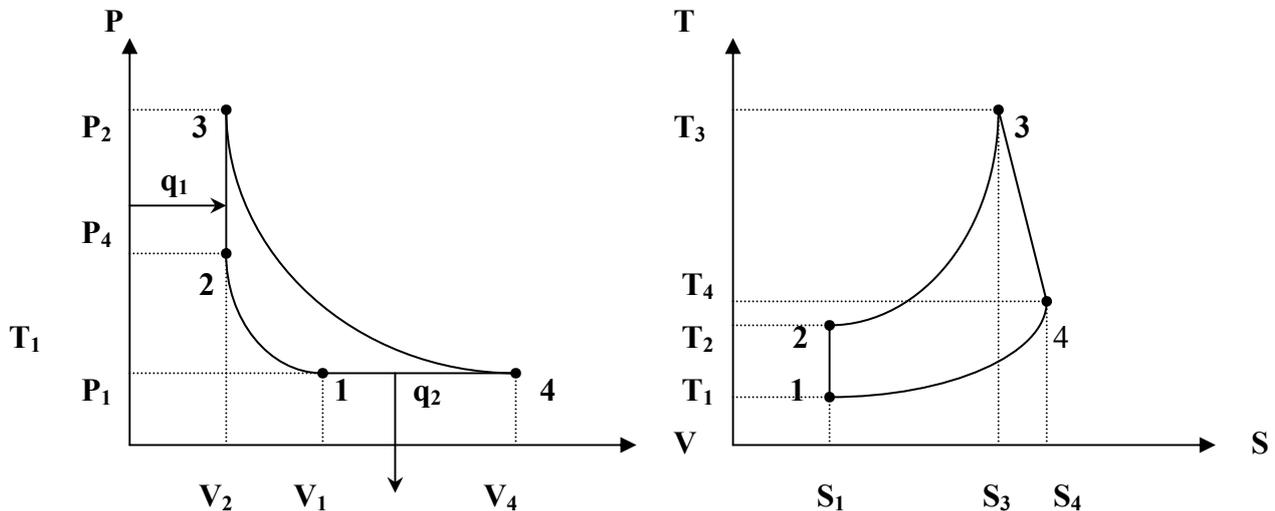


## Решение

$P_1$ , бар	$t_1$ , °C	$\varepsilon = V_1/V_2$	$P_3$ , бар	$q_{41}$ , кДж/кг	$\lambda$		
1.0	17	3.25	5.9	-100	1		

1. Построим цикл двигателя внутреннего сгорания в координатах PV и TS.



Рассматриваемый цикл является циклом с подводом теплоты при постоянном объеме  $V_2$  – процесс 2-3. Отвод теплоты происходит в процессе изобарного выпуска отработанных газов – процесс 4-1. Работа цикла есть площадь, ограниченная кривыми термодинамических процессов.

1. Для решения задачи воспользуемся результатами расчетно-графической работы №1.

$$\text{Молярная масса смеси: } \mu = 0.029 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$$\text{Теплоемкость при постоянном объеме: } C_v = 741,12 + 0,182 \cdot t - 9,24 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$$

$$\text{Теплоемкость при постоянном давлении: } C_p = 1029,23 + 0,182 \cdot t - 9,24 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$$

Подставим значение температуры  $t = t_1$ :

$$C_v = 741,12 + 0,182 \cdot 17 - 9,24 \cdot 10^{-5} \cdot 17^2 = 744,2 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$C_p = 1029,23 + 0,182 \cdot 17 - 9,24 \cdot 10^{-5} \cdot 17^2 = 1032,3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$\text{Газовая постоянная: } R = C_p - C_v = 288,1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$\text{Показатель адиабаты: } K = \frac{C_p}{C_v} = \frac{1032,3}{744,2} = 1,387$$

Считаем, что энтропией равной нулю обладает газовая смесь при значении абсолютного давления  $P_0 = 10^5$  МПа и температуры  $T_0 = 273,15$  К.

2. Рассчитываем термодинамические параметры воздуха в соответствующих точках цикла, обозначенных на диаграммах **PV** и **TS**.

**Точка 1.** Температура:  $T_1 = 290$  К, - из условий задачи

Давление:  $P_1 = 1,0$  , бар - из условий задачи

Объем:  $V_1 = \frac{R \cdot T_1}{P_1} = 0,836$  м<sup>3</sup>/кг,

Энтропия начального состояния.

$$S_1 = C_p \cdot \ln \frac{T_1}{T_0} - R \cdot \ln \frac{P_1}{P_0} = 61,79 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

**Точка 2.** Рассчитываем параметры в конце адиабатного сжатия газа.

Объем:  $V_2 = \frac{V_1}{\varepsilon} = 0,257$  м<sup>3</sup>/кг

Давление:  $P_2 = P_1 \cdot \varepsilon^K = 5,129$  , бар

Температура:  $T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{K-1} = 457,7$  , К

Энтропия:  $S_2 = S_1$

**Точка 3.** Вычислим степень повышения давления  $\lambda$ .

$$\lambda = \frac{P_3}{P_2} = 1,15$$

Объем:  $V_3 = V_2 = 0,257$  м<sup>3</sup>/кг

Температура:  $T_3 = \lambda \cdot T_2 = 526,5$  , К

Энтропия:  $S_3 = S_2 + C_v \cdot \ln \lambda = 166,0 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$

**Точка 4.** Рассчитываем параметры в конце политропного расширения с показателем  $n_2$ .

Давление:  $P_4 = P_1 = 5,9$  , бар

$$T_4 = T_1 - \frac{q_{4-1}}{C_p} = 386,9 \text{ К}$$

Вычислим показатель политропного процесса  $n_2$ .

$$n_2 = \frac{\ln (P_3 / P_4)}{\ln (P_3 / P_4) - \ln (T_3 / T_4)} = 1,21$$

Теплоемкость процесса 3-1:  $C_n = C_v \cdot \frac{(n - K)}{n - 1} = -627,5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$

$$\text{Объем: } V_4 = V_3 \cdot \left| \frac{P_3}{P_4} \right|^{1/n_2} = 1,115, \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$\text{Энтропия: } S_4 = S_3 + C_p \cdot \ln \frac{T_4}{T_3} = 359,3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Составляем сводную таблицу.

	Характерные точки			
	1	2	3	4
<b>P, бар</b>	<b>1,0</b>	<b>5,129</b>	<b>5,9</b>	<b>1,0</b>
<b>V, м<sup>3</sup>/кг</b>	<b>0,836</b>	<b>0,257</b>	<b>0,257</b>	<b>1,115</b>
<b>T, К</b>	<b>290</b>	<b>457,7</b>	<b>526,5</b>	<b>386,9</b>
<b>S, Дж/(кг·К)</b>	<b>61,8</b>	<b>61,8</b>	<b>166,0</b>	<b>359,3</b>

3. Рассчитываем энергетические параметры процессов.

**Процесс 1-2** – адиабатное сжатие с показателем **K**.

$$\text{Количество теплоты: } q_{1-2} = 0$$

$$\text{Работа и изменение внутренней энергии: } l_{1-2} = -\Delta u_{1-2} = C_v(T_2 - T_1) = 124,79 \text{ кДж/кг}$$

$$\text{Изменение энтальпии: } \Delta i_{1-2} = C_p(T_2 - T_1) = 173,1 \text{ кДж/кг}$$

$$\text{Изменение энтропии: } \Delta S_{1-2} = 0$$

**Процесс 2-3** – изохорный нагрев. Работа не совершается:  $l_{2-3} = 0$

$$\text{Количество теплоты: } q_1 = \Delta u_{2-3} = C_v(T_3 - T_2) = 71,0 \text{ кДж/кг}$$

$$\text{Изменение энтальпии: } \Delta i_{2-3} = C_p(T_3 - T_2) = 51,19 \text{ кДж/кг}$$

$$\text{Изменение энтропии: } \Delta S_{2-3} = C_v \cdot \ln \frac{T_3}{T_2} = 104,2 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

**Процесс 3-4** – политропное расширение с показателем **n<sub>2</sub>**.

$$\text{Количество теплоты: } q_{3-4} = C_2(T_4 - T_3) = 87,6 \text{ кДж/кг}$$

$$\text{Изменение внутренней энергии: } \Delta u_{3-4} = C_v(T_4 - T_3) = -103,89 \text{ кДж/кг}$$

$$\text{Изменение энтальпии: } \Delta i_{3-4} = C_p(T_4 - T_3) = -144,1 \text{ кДж/кг}$$

$$\text{Работа процесса: } l_{3-4} = \frac{R \cdot (T_3 - T_4)}{n_2 - 1} = 191,48 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$\text{Изменение энтропии: } \Delta S_{3-4} = C_2 \cdot \ln \frac{T_4}{T_3} = 193,3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

**Процесс 4-1** – изобарное охлаждение. Изменение энтальпии равно отведенной теплоте.

$$\text{Количество теплоты: } q_{4-1} = q_2 = \Delta i_{4-1} = C_p(T_1 - T_4) = -100,0 \text{ кДж/кг}$$

$$\text{Изменение внутренней энергии: } \Delta u_{4-1} = C_v(T_1 - T_4) = -72,09 \text{ кДж/кг}$$

$$\text{Работа сжатия газа: } \ell_{4-1} = p_4(V_1 - V_4) = -27,91 \text{ кДж/кг}$$

$$\text{Изменение энтропии: } \Delta S_{4-1} = C_p \cdot \ln \frac{T_1}{T_4} = -297,5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Составляем сводную таблицу.

Процесс	n	C, кДж/кг	ℓ, кДж/кг	q, кДж/кг	Δu, кДж/кг	Δi, кДж/кг	ΔS, Дж/(кг·К)	ψ = Δu/q
1-2	1,387	0	124,79	0,0	124,79	173,1	0,0	+ ∞
2-3	+ ∞	744,2	0,0	71,0	51,19	71,0	104,2	0,72
3-4	1,21	0	191,48	87,6	-103,89	-144,1	193,3	-1,19
4-1	0	1032,3	-27,91	-100,0	-72,09	-100,0	-297,5	0,72

#### 4. Индикаторные параметры процесса.

Термический КПД цикла:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_{\text{отв}}}{q_{\text{подв}}} = 1 - \frac{100,0}{158,6} = 0,369$$

Термический КПД цикла Карно, работающем в том же интервале температур:

$$\eta_k = 1 - \frac{T_1}{T_3} = 1 - \frac{290,0}{386,9} = 0,449$$

#### 5. Итоговая таблица.

Для цикла	∑q подв, кДж/кг	∑q отв, кДж/кг	∑ℓ, кДж/кг	∑q, кДж/кг	∑Δu, кДж/кг	∑Δi, кДж/кг	∑ΔS, Дж/(кг·К)	η <sub>t</sub>
	158,6	-100,0	288,37	58,6	0	0	0	0,369

#### 6. Расчет точек для построения рабочей и тепловой диаграмм цикла.

Для рабочей диаграммы независимым параметром выбираем относительный объем или давление (если объем не изменяется). Пользуясь формулами, приведенными в пункте 2, вычисляем все требуемые величины.

##### Процесс 1-2

	Характерные точки			
	1	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	2
P, бар	1,0	1,302	2,762	5,129
V, м <sup>3</sup> /кг	0,836	0,691	0,402	0,257
T, К	290,0	312,1	385,1	457,7
S, Дж/(кг·К)	61,8	61,8	61,8	61,8

##### Процесс 2-3

	Характерные точки			
	2	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	3
P, бар	5,129	5,322	5,707	5,9
V, м <sup>3</sup> /кг	0,257	0,257	0,257	0,257
T, К	457,7	474,9	509,3	526,5
S, Дж/(кг·К)	61,8	89,2	141,3	166,0

## Процесс 3-4

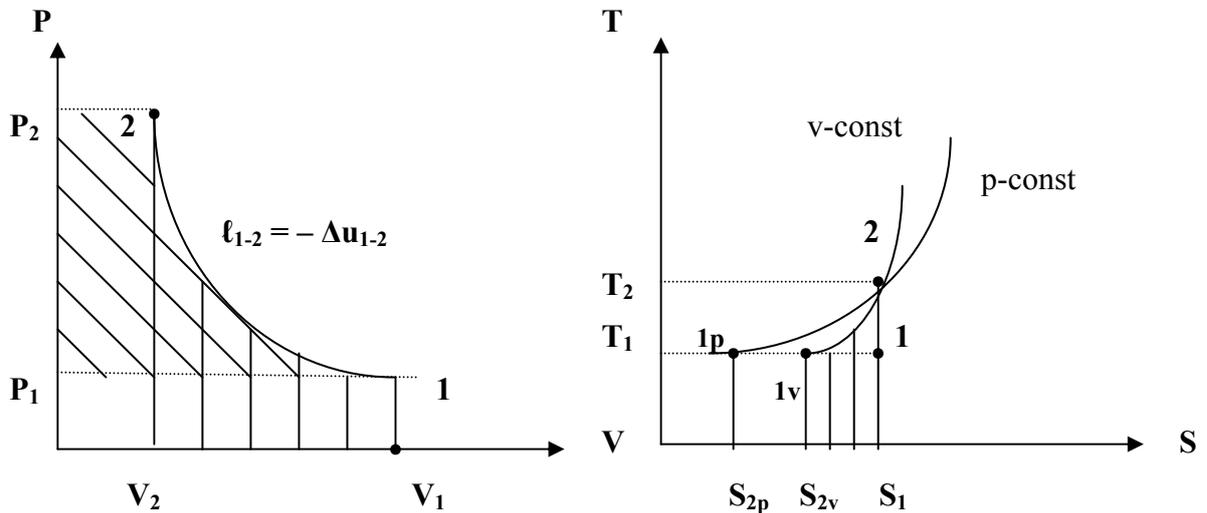
	Характерные точки			
	3	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	4
P, бар	5,9	2,832	1,295	1,0
V, м <sup>3</sup> /кг	0,257	0,471	0,9	1,115
T, К	526,5	463,5	404,6	386,9
S, Дж/(кг·К)	166,0	245,9	331,2	359,3

## Процесс 4-1

	Характерные точки			
	4	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	1
P, бар	1,0	1,0	1,0	1,0
V, м <sup>3</sup> /кг	1,115	0,905	1,045	0,836
T, К	386,9	314,2	362,7	290,0
S, Дж/(кг·К)	359,3	144,6	292,6	61,8

7. Схемы распределения энергии в циклах.

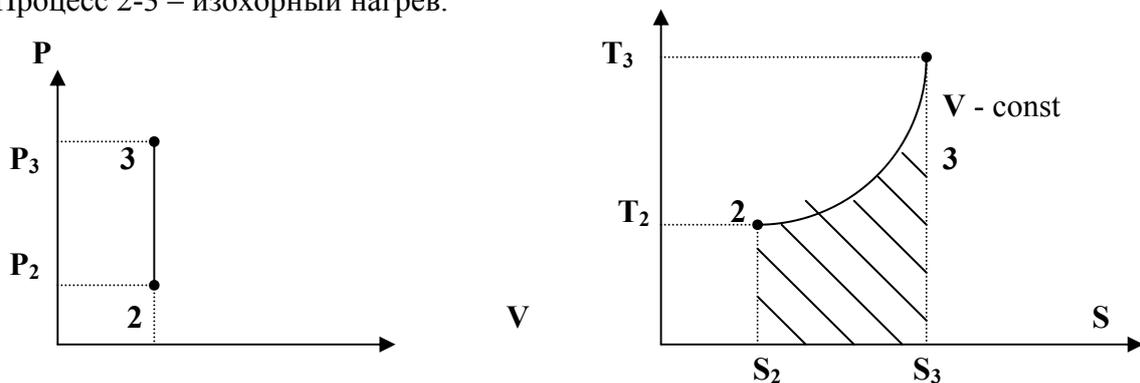
7.1. Процесс 1-2 – адиабатное сжатие с показателем  $K$ .



Заштрихованная вертикальной штриховкой площадь на рабочей диаграмме представляет собой работу  $l_{1-2}$  или изменение внутренней энергии  $-\Delta u_{1-2}$ . Изменение энтальпии  $\Delta i_{1-2}$  показано косой штриховкой.

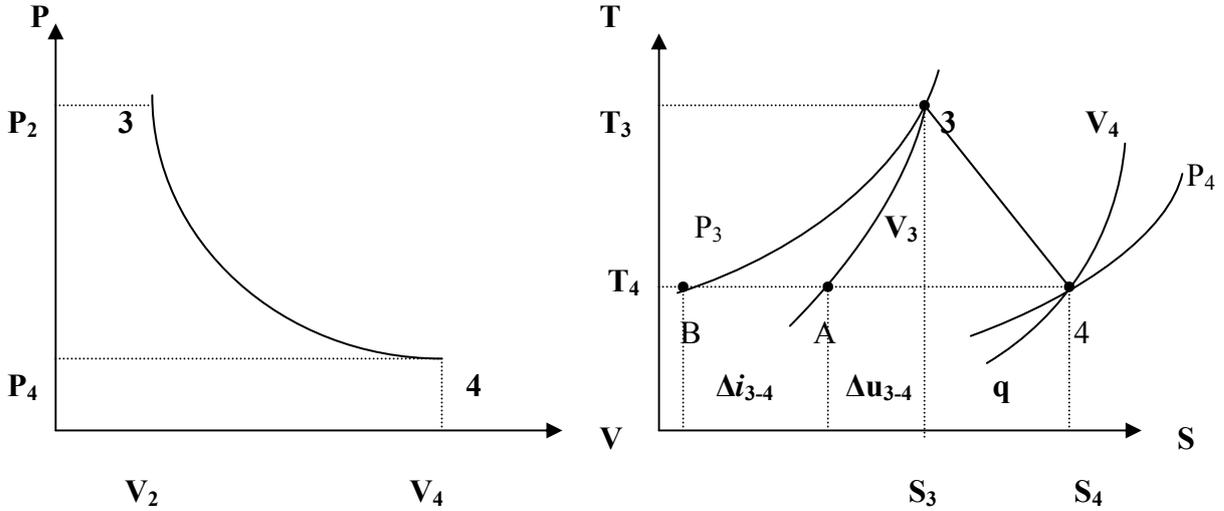
Площадь, образованная криволинейной трапецией  $S_{2p} - 1p - 2 - 1 - S_{2p}$  на тепловой диаграмме есть приращение энтальпии в процессе  $\Delta i_{1-2}$ . Площадь  $S_{2v} - 1v - 2 - 1 - S_{2v}$  есть работа  $l_{1-2}$  или изменение внутренней энергии  $\Delta u_{1-2}$ .

7.2. Процесс 2-3 – изохорный нагрев.



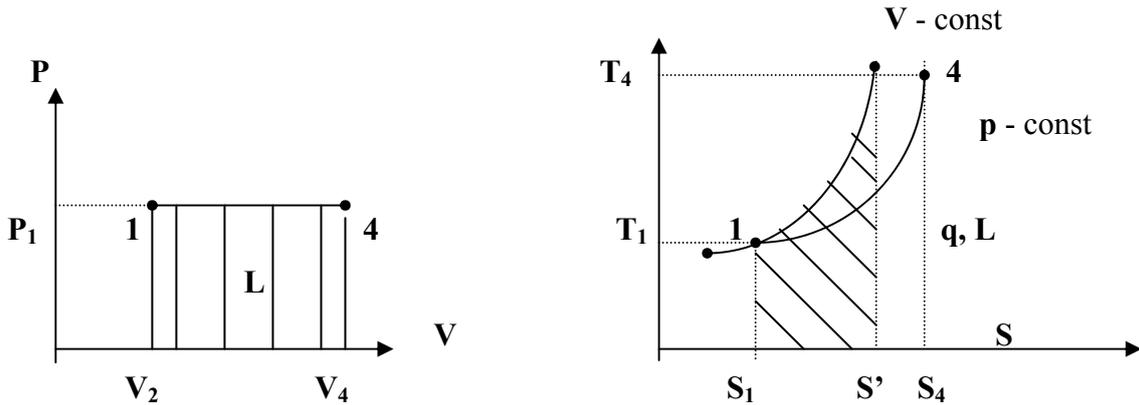
Работа в изохорном процессе не совершается. Площадь под кривой процесса 2-3-S<sub>3</sub>-S<sub>2</sub> – есть внутренняя энергия.

7.3. Процесс 3-4 – политропное расширение с показателем  $n_2$ .



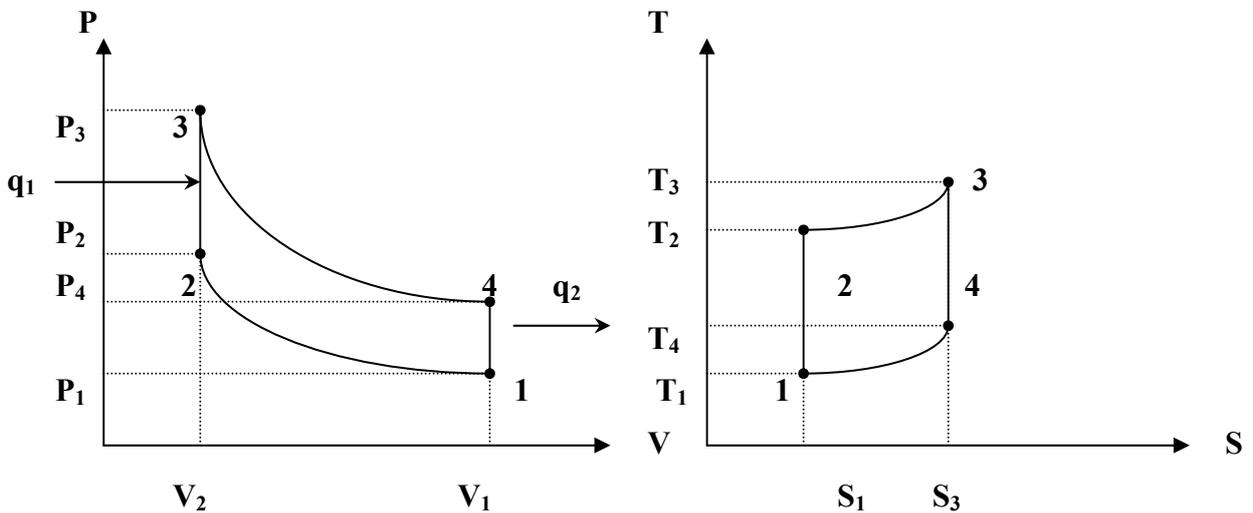
Изменение внутренней энергии и энтальпии в политропном процессе определяются площадями соответственно под изохорным и изобарным процессами, происходящими в том же интервале температур.

7.4. Процесс 4-1 – изобарное сжатие с отводом энергии  $q_2$ .



$\Delta u_{4-1}$  - заштрихованная площадь в T-S .  $q, L$  – площадь  $S_1 - 1 - 4 - S_4$ .

8. Вычисление работы и термического КПД для цикла с подводом тепла при постоянном объеме (Цикл Отто).



Рассматриваемый цикл (цикл Отто) называют циклом с подводом теплоты при постоянном объеме. Нагрев рабочего тела осуществляется при постоянном объеме – процесс 2-3. Отвод теплоты происходит в процессе изохорного выпуска отработанных газов – процесс 4-1. Работа цикла есть площадь, ограниченная кривыми термодинамических процессов.

$$\begin{aligned} \text{Работа процесса:} \quad \ell_{1-2} &= \frac{R \cdot (T_1 - T_2)}{n_1 - 1} = -124,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \\ \ell_{3-4} &= \frac{R \cdot (T_3 - T_4)}{n_2 - 1} = 191,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \\ L &= \ell_{1-2} + \ell_{3-4} = 66,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \end{aligned}$$

Термический КПД цикла поршневого двигателя с подводом теплоты при **V-const**:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1 - 1}} = 1 - \frac{1}{3,25^{0,387}} = 0,366$$

МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
КАФЕДРА 204

РАСЧЕТНО – ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА №2

ПО КУРСУ  
«ТЕРМОДИНАМИКА»

Студент Д.А.Агеев  
Группа 02 – 305  
Преподаватель Иноземцев

МОСКВА  
2003