

# Первый закон термодинамики

$$Q = \Delta U + L \quad (1)$$

В технической термодинамике первый закон формулируется следующим образом:

теплота, подводимая к системе, в общем случае расходуется как на изменение ее внутренней энергии, так и на совершение работы изменения объема.

При переходе к удельным величинам выражение приобретает вид:

$$q = \Delta u + l \quad (2)$$

Записывая (2) для бесконечно малого процесса будем иметь:

$$dq = du + dl \quad (3)$$

$$dq = du + p dv \quad (4)$$

# Первый закон термодинамики

**Вечный двигатель первого рода** — устройство, способное бесконечно совершать [работу](#) — устройство, способное бесконечно совершать работу без затрат топлива или других [энергетических](#) ресурсов.

- В [1775 году](#) В 1775 году [Парижская академия наук](#) В 1775 году Парижская академия наук приняла решение не рассматривать проекты вечного двигателя из-за очевидной невозможности их создания. [Патентное ведомство США](#) В 1775 году Парижская академия наук приняла решение не рассматривать проекты вечного двигателя из-за очевидной невозможности их создания. Патентное ведомство США не выдаёт патенты на *perpetuum mobile* уже более ста лет. Тем не менее, в [Международной патентной классификации](#) В 1775 году Парижская академия наук приняла решение не рассматривать проекты вечного двигателя из-за очевидной невозможности их создания. Патентное ведомство США не выдаёт патенты на *perpetuum mobile* уже более ста лет. Тем не менее, в Международной патентной классификации сохраняются разделы для гидродинамических ([раздел F03B 17/00](#)) В 1775 году Парижская академия наук приняла решение не рассматривать

# Термодинамические процессы идеального газа

- К основным процессам относятся:
  - Изохорный (при постоянном объеме);
  - Изобарный (при постоянном давлении);
  - Изотермический (при постоянной температуре);
  - Адиабатный (без теплообмена с окружающей средой)

ПОЛИТРОПНЫЙ ПРОЦЕСС – Обобщенный процесс

# Полиетропный процесс

- Постоянство теплоемкости определяет закономерность изменения параметров в полиетропном процессе.

*Изохорный, изобарный, изотермический и адиабатный процессы – полиетропные процессы.*

# Показатель политропы

Первый закон термодинамики:

$$\begin{aligned} \bullet \partial q &= c dT = dh - v dp = c_p dT - v dp; & (c - c_p) dT &= - v dp, \\ \bullet \partial q &= c dT = du + p dv = c_v dT + p dv. & \rightarrow & (c - c_v) dT = p dv. \end{aligned}$$

$$\frac{c - c_p}{c - c_v} = - \frac{v dp}{p dv}$$

$$n = \frac{c - c_p}{c - c_v}$$

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

# Взаимосвязь основных параметров

$$T\nu^{n-1} = \textit{const}$$

$$T\rho^{\frac{1-n}{n}} = \textit{const}$$

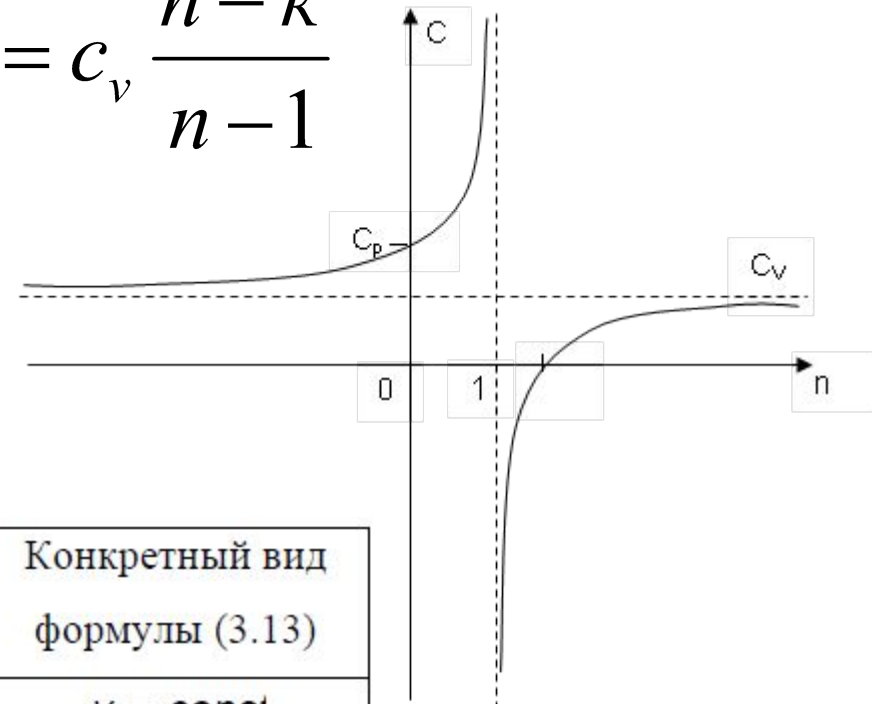
# Теплоемкость при политропном процессе

$$n = \frac{c - c_p}{c - c_v}$$



$$c = c_v \frac{n - \kappa}{n - 1}$$

Показатель политропы может иметь численные значения от  $-\infty$  до  $+\infty$ . В соответствии с уравнением теплоемкость политропных процессов в зависимости от  $n$  также может принимать значения от  $-\infty$  до



Изопроцесс	Теплоемкость в процессе	$n$	Конкретный вид формулы (3.13)
Изохорный	$c_v$	$\pm \infty$	$v = const$
Изобарный	$c_p$	0	$p = const$
Изотермический	$\infty$	1	$pv = const$
Адиабатный	0	$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$	$pv^\kappa = const$



# Изменение основных параметров

Изменение внутренней энергии

$$u_2 - u_1 = c_v(T_2 - T_1)$$

Изменение энтальпии

$$h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1)$$

Изменение энтропии

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{cdT}{T} = c \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v \frac{n - \kappa}{n - 1} \ln \frac{T_2}{T_1}$$

Количество теплоты

$$q = \int_1^2 T ds = c(T_2 - T_1) = c_v \frac{n - \kappa}{n - 1} (T_2 - T_1)$$

Работ

$$l = \int_1^2 p dv = q - (u_2 - u_1) = c_v \frac{n - \kappa}{n - 1} (T_2 - T_1) - c_v (T_2 - T_1) = c_v \frac{1 - \kappa}{n - 1} (T_2 - T_1) = \frac{R}{n - 1} (T_1 - T_2) = \frac{R}{n - 1} T_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)$$

# Частные случаи политропного процесса

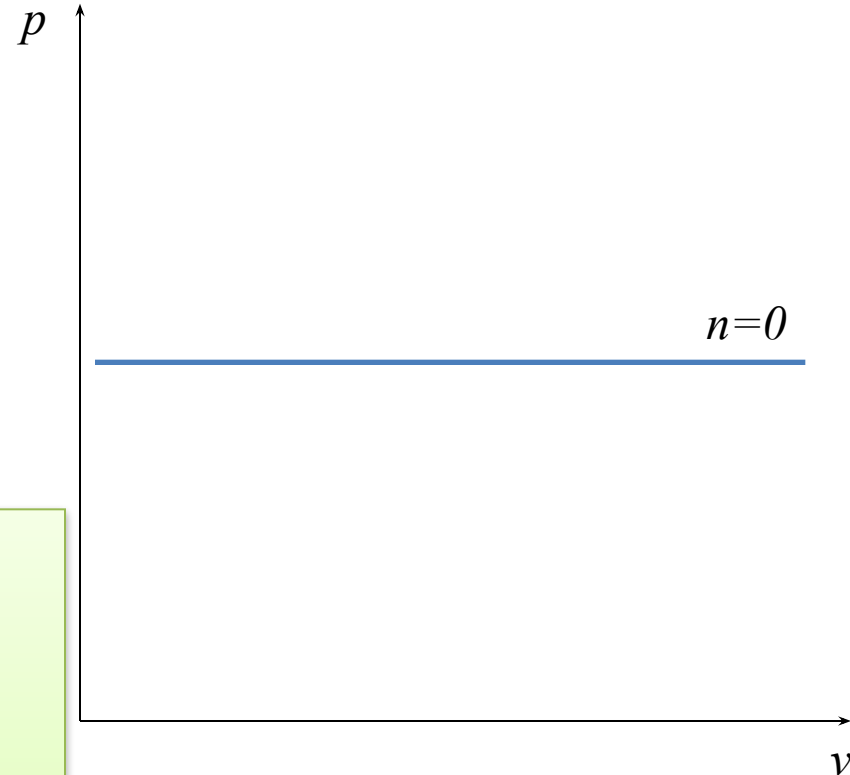
## Изобарный процесс

Протекает при постоянном давлении.

$$p = \text{const.}$$

Политропа превращается в **изобару** при  $n=0$ .

Уравнение  $Tv^{n-1} = \text{const}$ , при  $n=0$  превращается в уравнение  $T/v = \text{const}$ .



Изменение внутренней энергии  $u_2 - u_1 = c_v(T_2 - T_1)$ ;

Изменение энтальпии  $h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1) = q_p$ ;  
 $s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} = c_p \ln \frac{v_2^{\gamma} p}{v_1^{\gamma} p}$

Изменение энтропии

Количество теплоты  $q_p = c_p(T_2 - T_1) = h_2 - h_1$   
 $l_p = \int_1^2 p dv = p(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1)$

Работа изменения объема

# Частные случаи политропного процесса

## Изохорный процесс

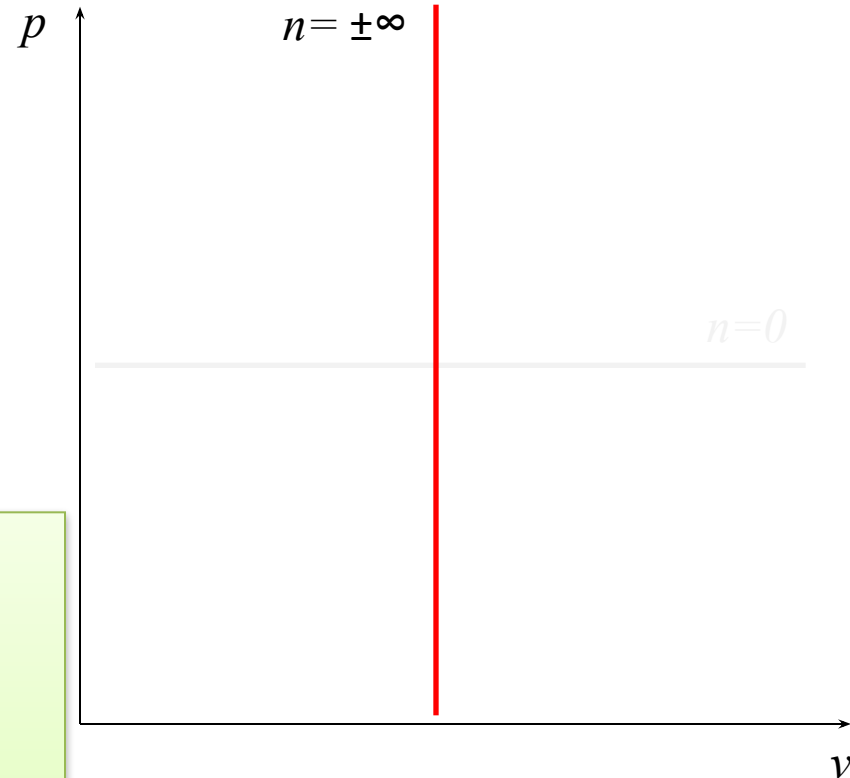
Протекает при постоянном объеме.

$$v = \text{const.}$$

Политропа превращается в **изохору** при

$$n = \pm\infty.$$

Уравнение  $Tp^{(1-n)/n} = \text{const}$ , при  $n = \pm\infty$  превращается в уравнение  $T/p = \text{const}$ .



Изменение внутренней энергии  $u_2 - u_1 = c_v(T_2 - T_1)$ ;

Изменение энтальпии  $h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1)$ ;  
 $s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v \ln \frac{p_2}{p_1}$

Изменение энтропии

Количество теплоты  $q_v = c_v(T_2 - T_1) = u_2 - u_1$   
 $l_v = \int p dv = 0$

Работа изменения объема

# Частные случаи политропного процесса

## Изотермический процесс

Протекает при постоянной температуре.

$$T = \text{const.}$$

Политропа превращается в **изотерму** при  $n=1$ .

Уравнение  $pv^n = \text{const}$ , при  $n=1$  превращается в уравнение  $pv = \text{const}$ .

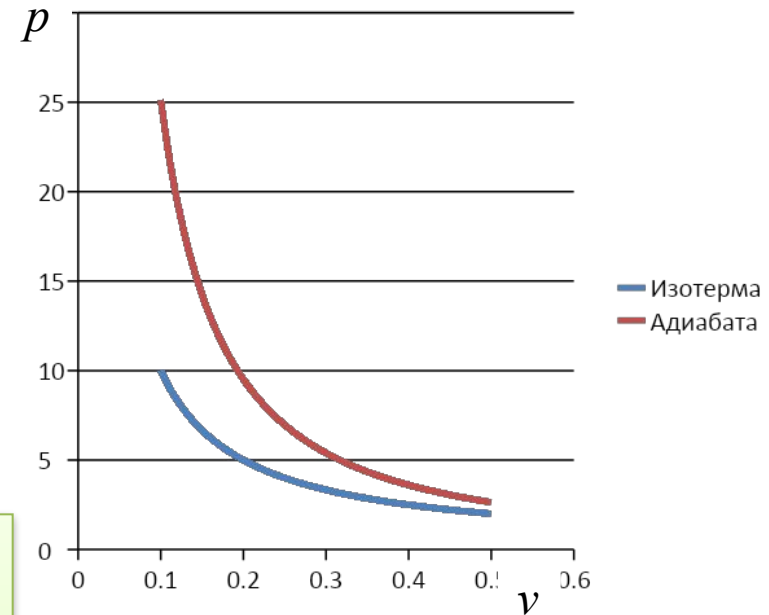
Изменение внутренней энергии  $u_2 - u_1 = 0$ ;

Изменение энтальпии  $h_2 - h_1 = 0$ ;

Изменение энтропии  $s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{\delta q}{T} = \frac{q_T}{T} = \frac{l_T}{T} = R \ln \frac{v_2}{v_1} = R \ln \frac{p_1}{p_2}$

Количество теплоты  $q_t = l_t$

Работа изменения объема  $a = \int_1^2 P dv = \int_1^2 \frac{RT}{v} dv = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2}$



# Частные случаи политропного процесса

## Адиабатный процесс

Протекает без теплообмена.  $dq=0$ .

Политропа превращается в **адиабату** при  $n=k$ .

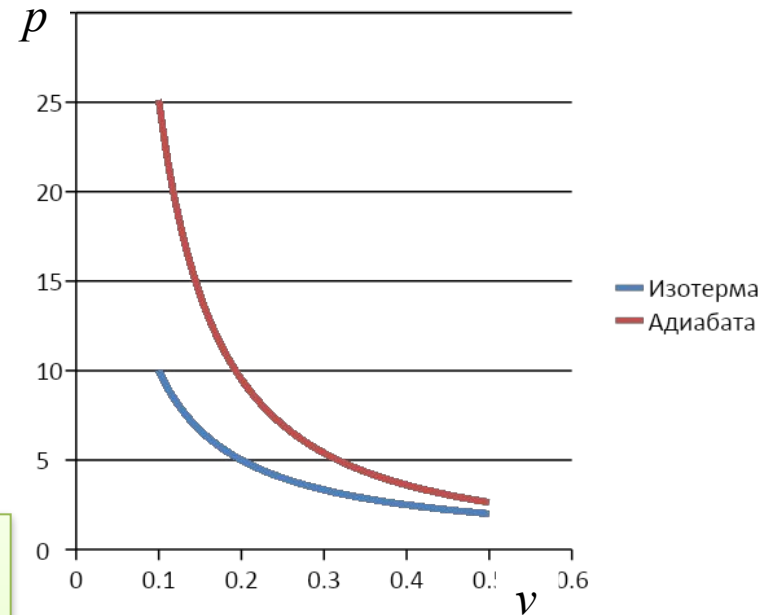
Уравнение  $pv^n = const$ , при  $n=k$  превращается в уравнение  $pv^k = const$ .

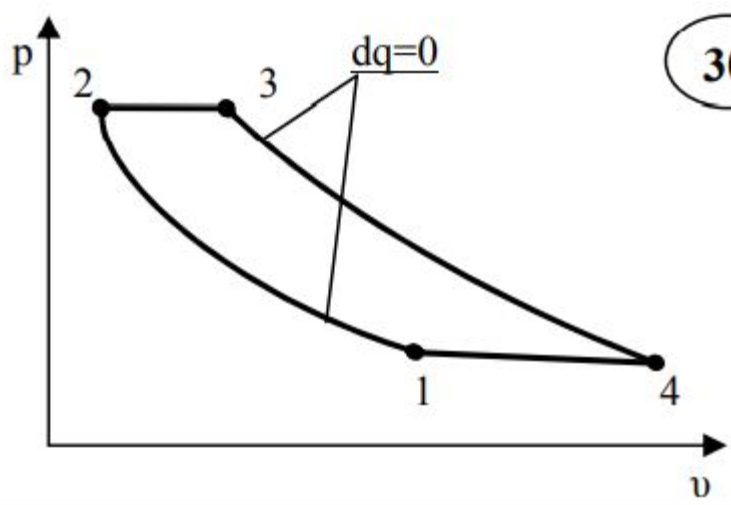
Изменение внутренней энергии  $u_2 - u_1 = c_v(T_2 - T_1)$ ;

Изменение энтальпии  $h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1)$ ;

Изменение энтропии  $ds=0$ ,  $s=const$   
(**ИЗОЭНТРОПНЫЙ**)

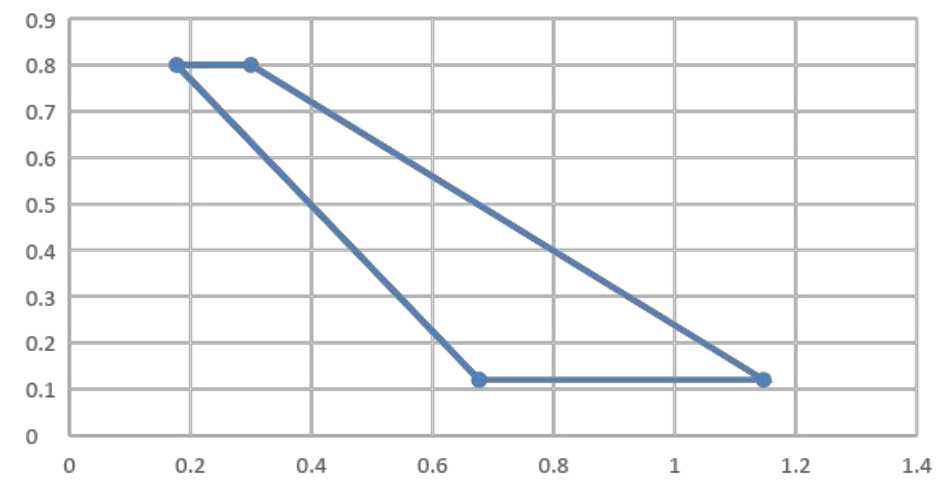
Количество теплоты  $dq = 0$



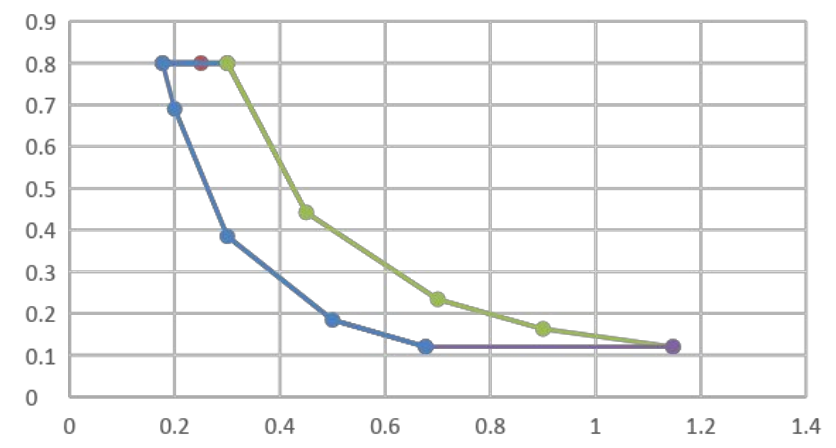


30

ЭТО ПЛОХО!



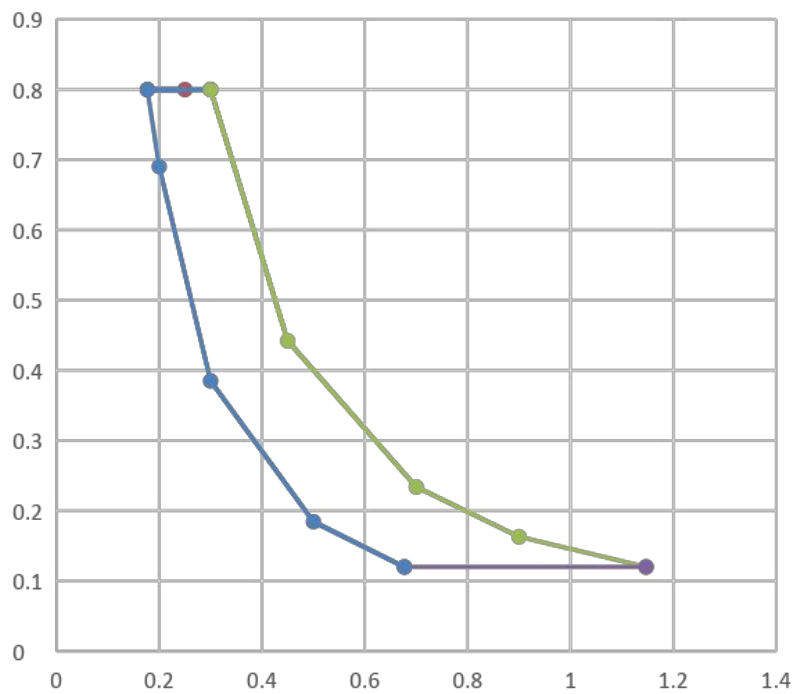
ЭТО НОРМА!



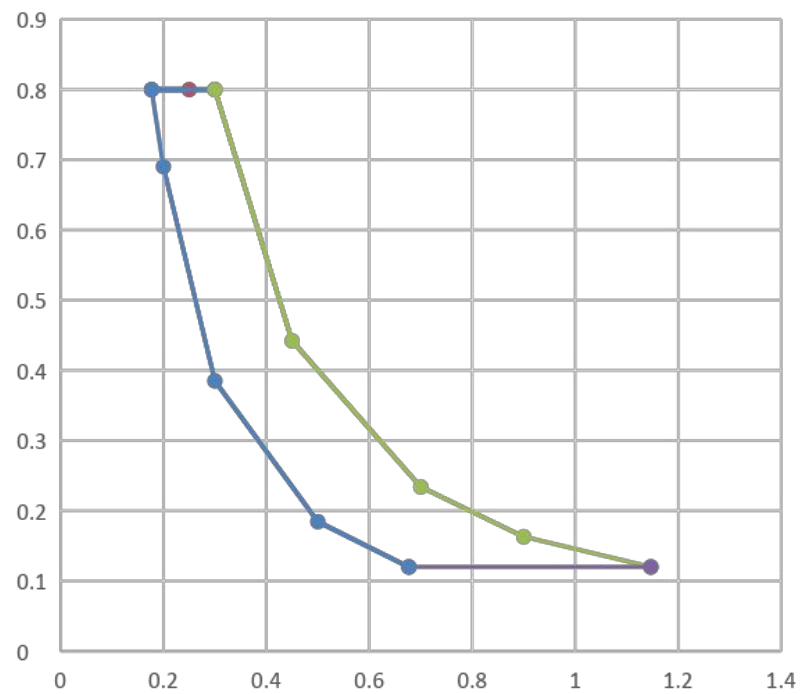
	0,12	0,677
	0,184498	0,5
	0,384994	0,3
	0,690281	0,2
	0,8	0,177
	0,8	0,25
	0,8	0,3
	0,442081	0,45
	0,233984	0,7
	0,162937	0,9
	0,12	1,147
	0,12	0,677

Точки цикла	p	v	T
	МПа	мкуб/кг	К
1	0,120	0,677	283
2	0,800	0,177	494
3	0,800	0,300	837
4	0,120	1,147	480

ЭТО НОРМА!



ЭТО НОРМА!



4. Положение точки 1 в Ts-координатах определяется, исходя из того, что условный нуль энтропии соответствует нормальным физическим условиям ( т.е.  $s_0 = 0$  при  $p_0 = 101325\text{Па}$  и  $T_0 = 273,15\text{ К}$ ) и энтропия воздуха в этом состоянии вычисляется по формуле:

$$s_1 = c_p \cdot \ln(T_1/T_0) - R \cdot \ln(p_1/p_0).$$

1) теплоемкости воздуха принять постоянными:

$c_p = 1,0\text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  и  $c_v = 0,71\text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;

$$s_1 = 1 \cdot \ln\left(\frac{283}{273,15}\right) - 0,287 \cdot \ln\left(\frac{0,12}{0,101}\right) = -0,014 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Точки цикла	p	v	T
	МПа	мкуб/кг	К
1	0.120	0.677	283
2	0.800	0.177	494
3	0.800	0.300	837
4	0.120	1.147	480

$$= 1 \cdot \ln\left(\frac{283}{273,15}\right) - 0,287 \cdot \ln\left(\frac{0,12}{0,101}\right) = -0,014 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$= 1 \cdot \ln\left(\frac{283}{273,15}\right) - 0,287 \cdot \ln\left(\frac{0,12}{0,101}\right) = -0,014 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$= 1 \cdot \ln\left(\frac{283}{273,15}\right) - 0,287 \cdot \ln\left(\frac{0,12}{0,101}\right) = -0,014 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$= 1 \cdot \ln\left(\frac{283}{273,15}\right) - 0,287 \cdot \ln\left(\frac{0,12}{0,101}\right) = -0,014 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Δs
кДж/кг
0.000
0.530
0.000
-0.530

$$s_1 = 1 \cdot \ln\left(\frac{283}{273,15}\right) - 0,287 \cdot \ln\left(\frac{0,12}{0,101}\right) = -0,014 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad - 0,014$$

$$s_1 = 1 \cdot \ln\left(\frac{283}{273,15}\right) - 0,287 \cdot \ln\left(\frac{0,12}{0,101}\right) = -0,014 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad 0,515$$

$$s_1 = 1 \cdot \ln\left(\frac{283}{273,15}\right) - 0,287 \cdot \ln\left(\frac{0,12}{0,101}\right) = -0,014 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad 0,515$$

$$s_1 = 1 \cdot \ln\left(\frac{283}{273,15}\right) - 0,287 \cdot \ln\left(\frac{0,12}{0,101}\right) = -0,014 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad - 0,014$$



## Изобарны

Изменение внутренней энергии  $u_2 - u_1 = c_v(T_2 - T_1)$ ;

Изменение энтальпии  $h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1) = q_p$ ;

Изменение энтропии  $s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} = c_p \ln \frac{v_2^{\gamma}}{v_1}$

Количество теплоты  $q_p = c_p(T_2 - T_1) = h_2 - h_1$   
 Работа изменения объема  $l_p = \int_1^2 p dv = p(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1)$

Работа изменения объема

Конечная точка

S1-S4

Начальная точка

## Изохорны

Изменение внутренней энергии  $u_2 - u_1 = c_v(T_2 - T_1)$ ;

Изменение энтальпии  $h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1)$ ;  
 $s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v \ln \frac{p_2}{p_1}$

Изменение энтропии

Количество теплоты  $q_v = c_v(T_2 - T_1) = u_2 - u_1$   
 Работа изменения объема  $l_v = \int_1^2 p dv = 0$

Работа изменения объема

## Изотермически

Изменение внутренней энергии  $u_2 - u_1 = c_v(T_2 - T_1)$ ;

Изменение энтальпии  $h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1)$ ;

Изменение энтропии  $s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{\delta q}{T} = c_p \ln \frac{v_2}{v_1}$

Количество теплоты  $q_t = l_t$

Работа изменения объема  $l_t = \int_1^2 p dv = R(T_2 - T_1) \ln \frac{v_2}{v_1}$

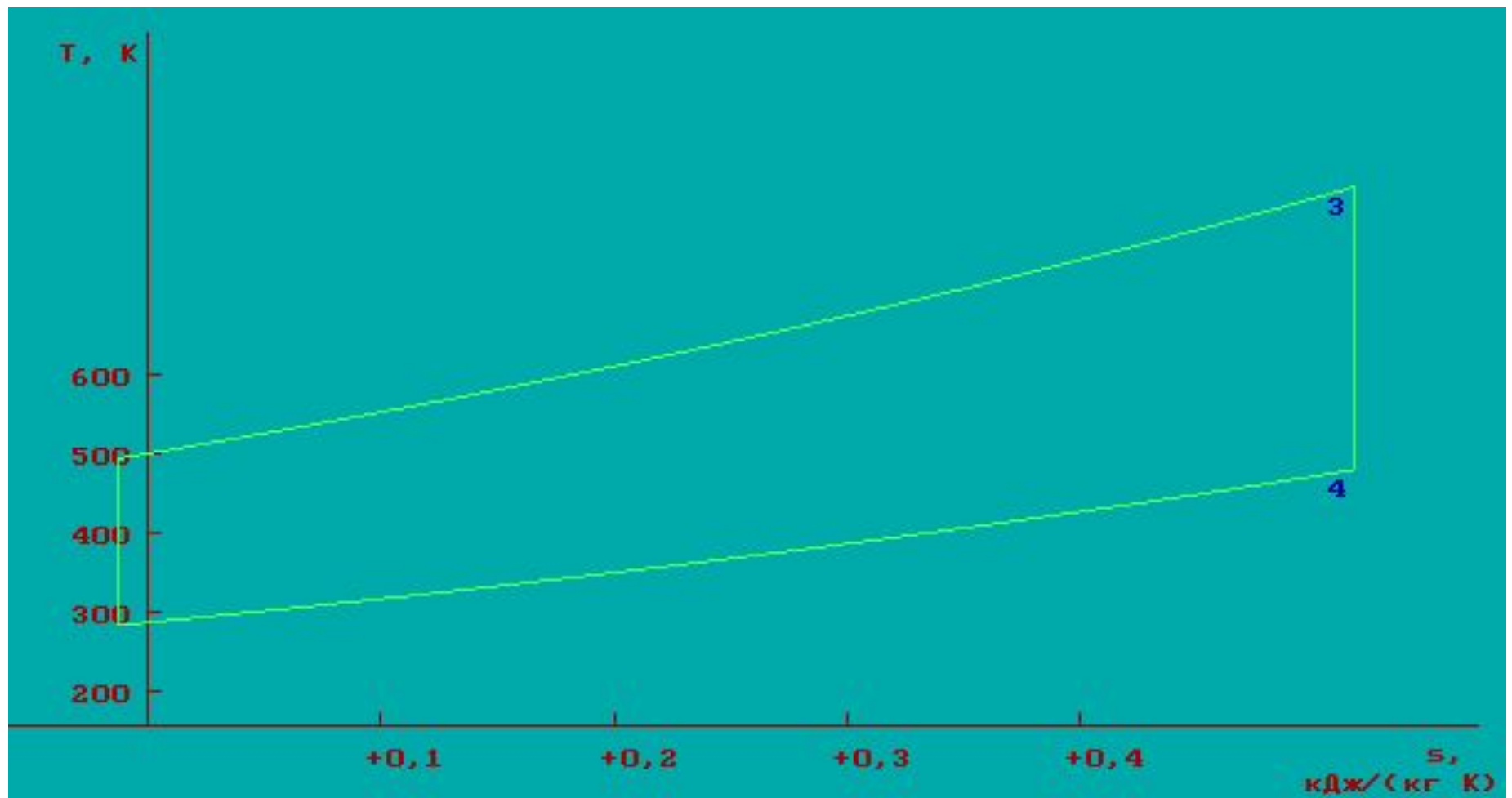
## Адиабатны

Изменение внутренней энергии  $u_2 - u_1 = c_v(T_2 - T_1)$ ;

Изменение энтальпии  $h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1)$ ;

Изменение энтропии  $ds=0, s=c$   
**(ИЗОЭНТРОПНЫЙ)**

Количество теплоты  $dq = 0$



КПД=Работа цикла/Подведенная  
теплота

Характерные точки цикла	$p$
	МПа
	2
1	
2	
3	
4	

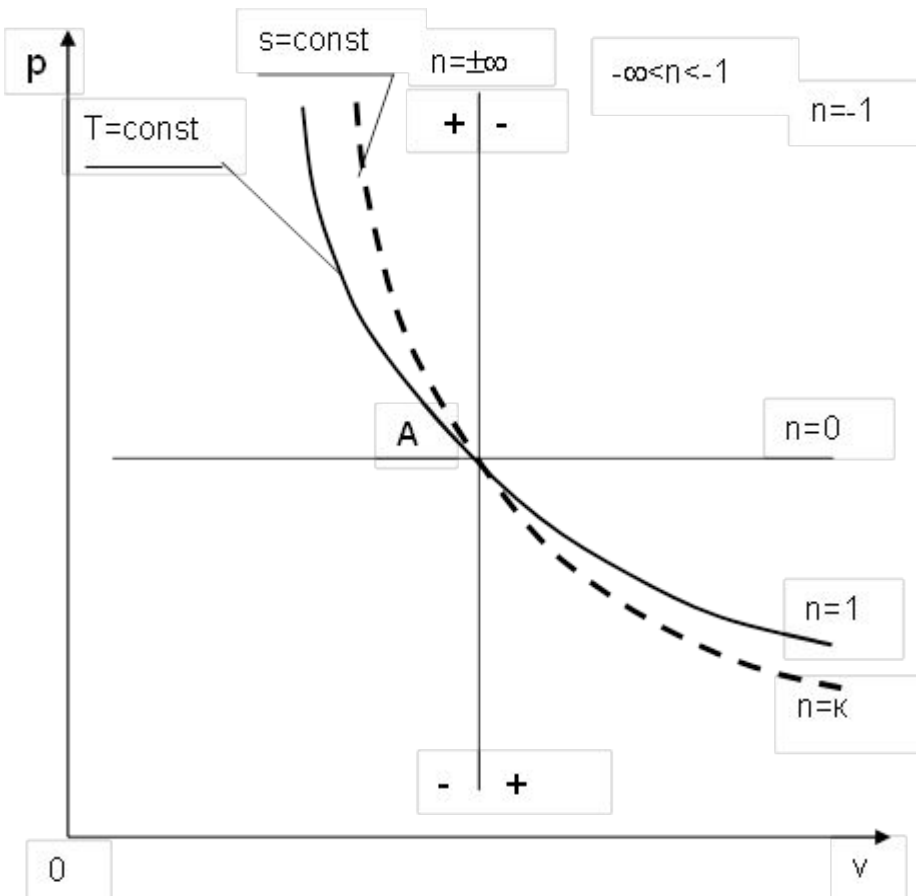
таблица результатов

Точки цикла	$p$	$v$	$T$	Про- цессы	$l$	$q$	$Δu$
	МПа	мкуб/кг	К		кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг
1	0.120	0.677	283	1-2	-148.5	0.0	148.5
2	0.800	0.177	494	2-3	98.4	344.7	243.5
3	0.800	0.300	837	3-4	251.7	0.0	-251.7
4	0.120	1.147	480	4-1	-56.4	-197.7	-139.7

Подведенная теплота 344.71 кДж/кг Отведенная теплота  
Работа цикла 146.07 кДж/кг  
КПД 42.7 %

# Изображение изопроецессов в $pV$ и $Ts$ координатах

Точка А, определяет начало процесса в  $Pv$ - и  $Ts$ - диаграммах



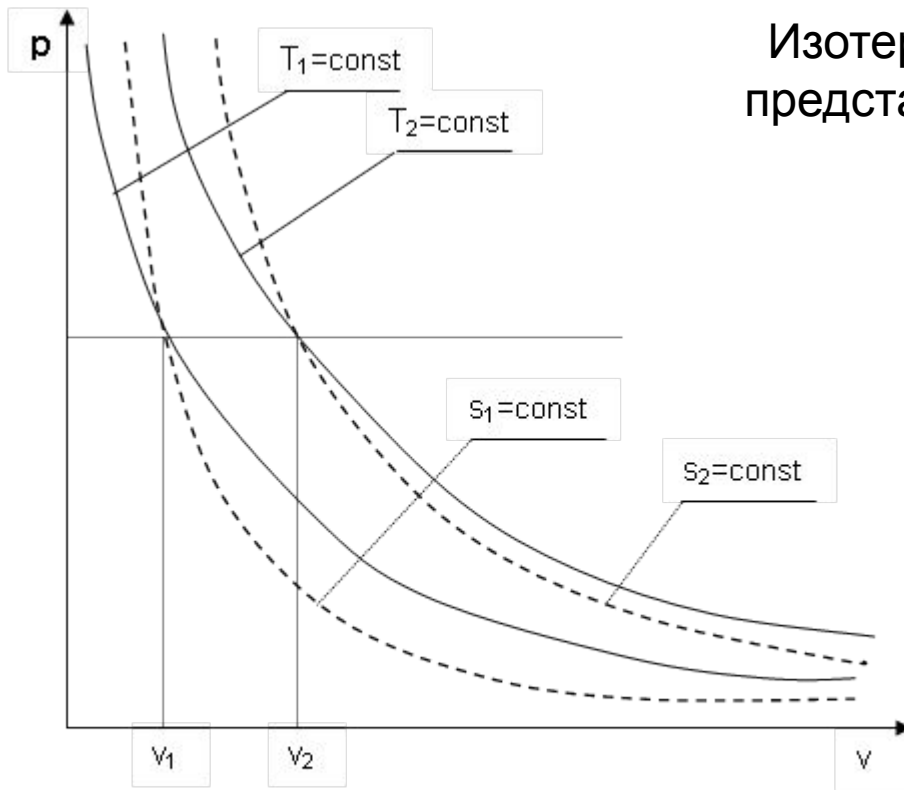
**изобара** – горизонтальная прямая,  $n=0$ ,  $P=\text{const}$ ;

**изохора** – вертикальная прямая,  $n=\pm\infty$ ,  $v=\text{const}$ ;

**изотерма** – равнобокая гипербола с осями асимптот в виде осей координат  $P$  и  $v$ , т.к. при  $n=1$  уравнение изотермы  $p=\text{const}/v$ , причем константа – величина положительная;

**адиабата** – неравнобокая гипербола, т.к. при  $n=\kappa > 1$  уравнение адиабаты  $P=\text{const}/v^\kappa$ , *адиабата круче изотермы.*

# Изображение изопроцессов в $pV$ и $Ts$ координатах

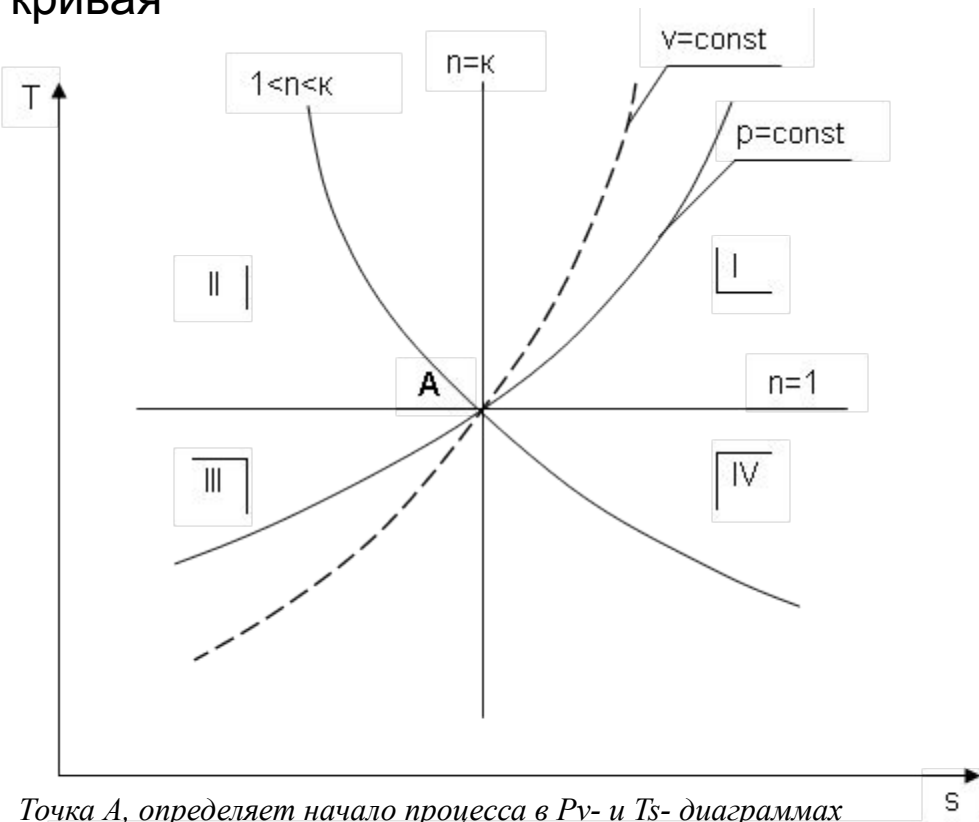


Изотермы и адиабаты идеального газа представляют собой непересекающиеся гиперболы

# Изображение изопроцессов в $pV$ и $Ts$ координатах

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{cdT}{T} = c \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v \frac{n - \kappa}{n - 1} \ln \frac{T_2}{T_1}$$

**Политропа** в координатах  $Ts$  – логарифмическая кривая

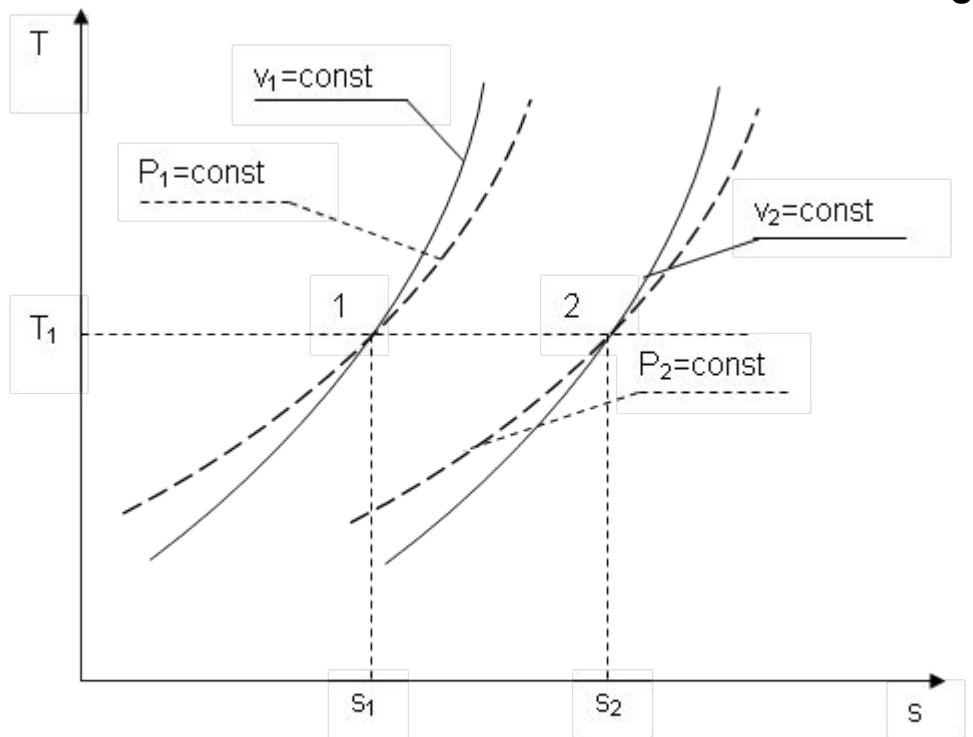


*Чем больше теплоемкость, тем меньше крутизна политропы*

*Изохора круче изобары, т.к.  $c_p > c_v$*

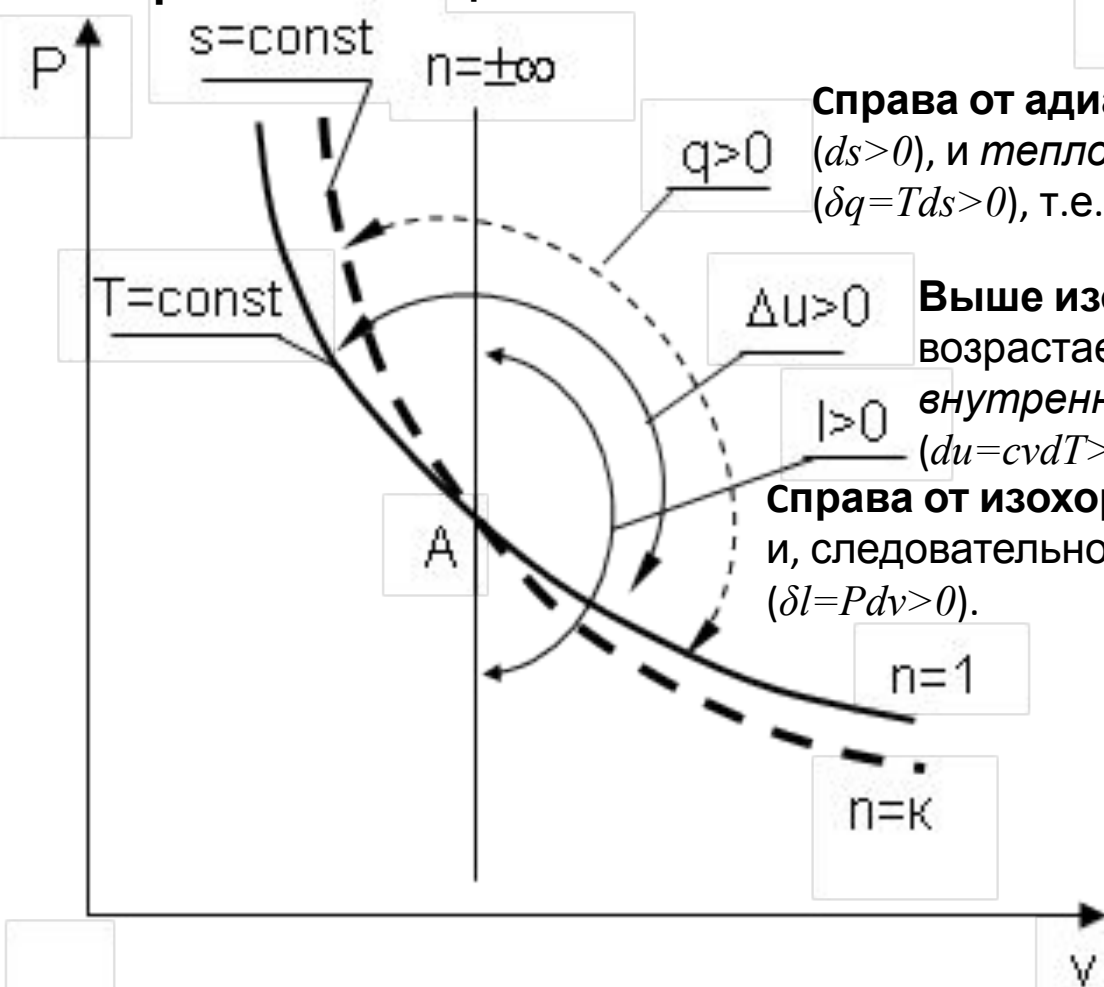
# Изображение изопроцессов в $pV$ и $Ts$ координатах

*В  $Ts$ - координатах изобары находятся одна над другой по возрастанию, а изохоры одна под другой по возрастанию*



# Качественный и количественный анализ политропных процессов в $Pv$ - и $Ts$ - диаграммах

Во всех процессах, начинающихся в точке **A** и располагающихся:



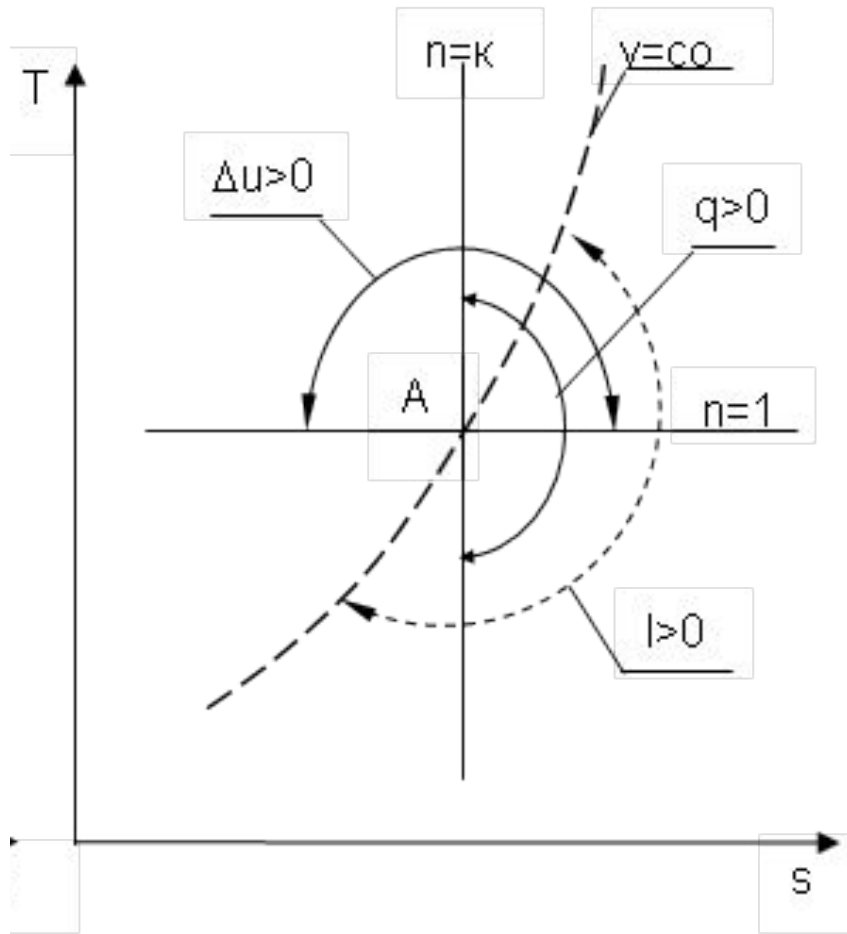
Справа от адиабаты ( $n = \kappa$ ), энтропия возрастает ( $ds > 0$ ), и теплота имеет положительный знак ( $\delta q = Tds > 0$ ), т.е. теплота к газу подводится.

Выше изотермы ( $n = 1$ ), температура возрастает ( $dT > 0$ ), и увеличивается внутренняя энергия и энтальпия газа ( $du = cvdT > 0$ ,  $dh = cpdT > 0$ )

Справа от изохоры ( $n = \pm\infty$ ), объем увеличивается ( $dv > 0$ ), и, следовательно, работа имеет положительный знак ( $\delta l = Pdv > 0$ ).



# Качественный и количественный анализ политропных процессов в $Pv$ - и $Ts$ - диаграммах



Точка  $A$ , определяет начало процесса в  $Pv$ - и  $Ts$ - диаграммах

# Использование первого закона термодинамики для энергетического анализа круговых процессов (циклов)

Уравнение первого закона термодинамики для циклов может быть получено в результате интегрирования  $du = du + dl$  уравнения по всему контуру цикла:

$$S_1 = 1 \cdot \ln\left(\frac{283}{273,15}\right) - 0,287 \cdot \ln\left(\frac{0,12}{0,101}\right) = -0,014 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$S_1 = 1 \cdot \ln\left(\frac{283}{273,15}\right) - 0,287 \cdot \ln\left(\frac{0,12}{0,101}\right) = -0,014 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

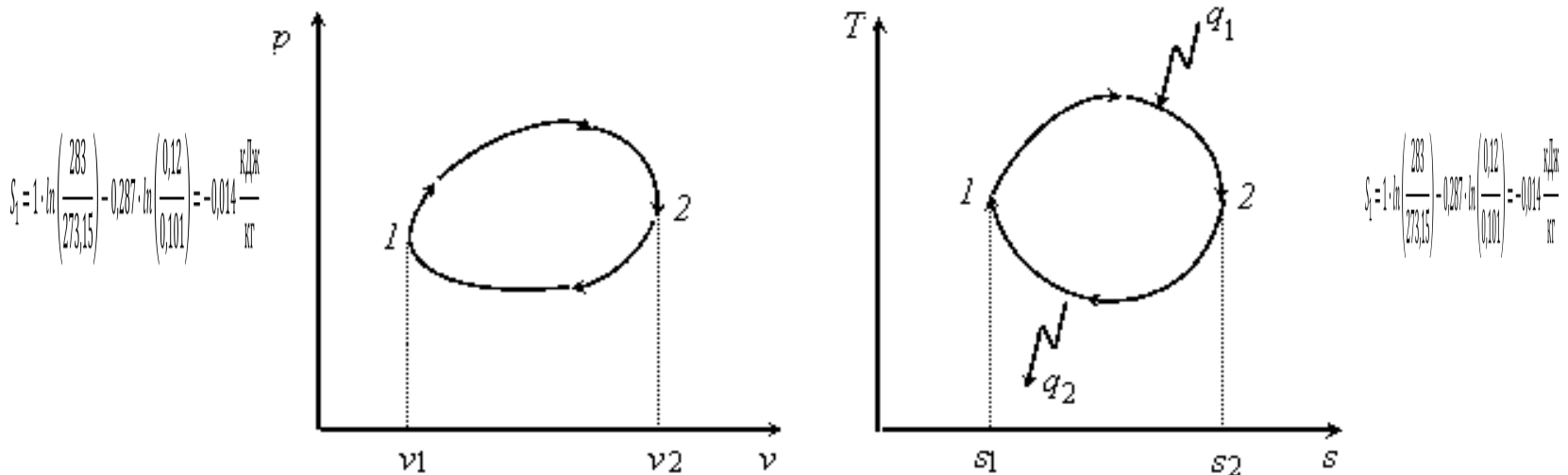
$$S_1 = 1 \cdot \ln\left(\frac{283}{273,15}\right) - 0,287 \cdot \ln\left(\frac{0,12}{0,101}\right) = -0,014 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$Q_{12} = L_{12}$$

Таким образом, первый закон термодинамики исключает возможность создания "вечного двигателя" первого рода, то есть двигателя, который производил бы работу, не требуя для этого затрат энергии.

# Использование первого закона термодинамики для энергетического анализа круговых процессов (циклов)

**Прямыми** называют циклы, в результате осуществления которых получается положительная работа за счет использованной теплоты



Прямые циклы позволяют получить работу за счет использованной в этом цикле теплоты. Такие циклы реализуют **в тепловых двигателях**, то есть установках, предназначенных для непрерывного получения работы за счет теплоты

**ТЕРМИЧЕСКИЙ КПД**

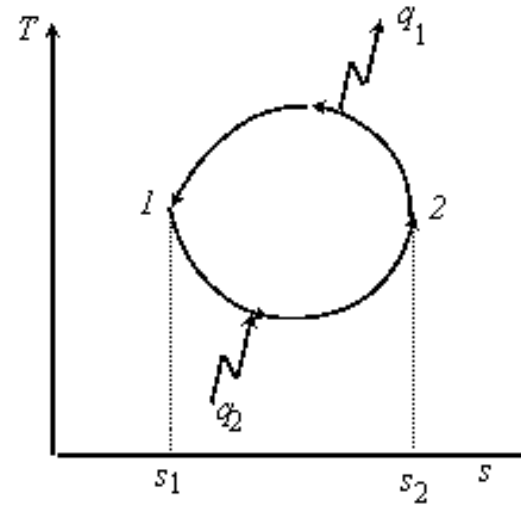
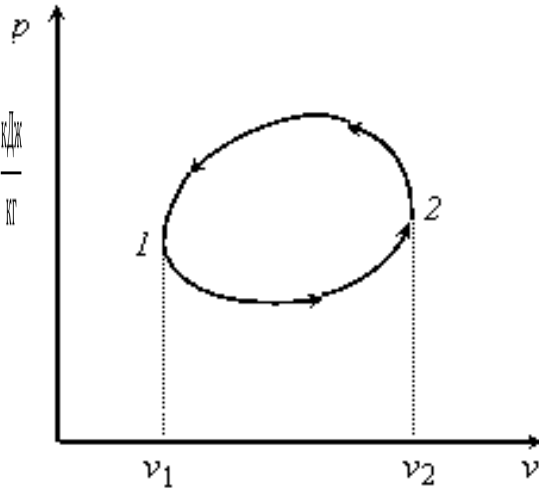
$$S_1 = 1 \cdot \ln\left(\frac{283}{273,15}\right) - 0,287 \cdot \ln\left(\frac{0,12}{0,101}\right) = -0,014 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Поскольку замкнуть цикл диаграммы, невозможно, не отводя от рабочего тела цикла некоторого количества теплоты, постольку термический КПД цикла всегда меньше единицы.

# Использование первого закона термодинамики для энергетического анализа круговых процессов (циклов)

**Обратными** называют циклы, для осуществления которых требуется затратить работу извне

$$S_1 = 1 \cdot \ln\left(\frac{283}{273,15}\right) - 0,287 \cdot \ln\left(\frac{0,12}{0,101}\right) = -0,014 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$



$$S_1 = 1 \cdot \ln\left(\frac{283}{273,15}\right) - 0,287 \cdot \ln\left(\frac{0,12}{0,101}\right) = -0,014 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Рабочее тело в обратном цикле получает теплоту при температуре более низкой, чем отдает ее.

Обратные циклы в силу их особенностей используют **в холодильных машинах, тепловых насосах и трансформаторах теплоты**

**Холодильный КПД**

$$S_1 = 1 \cdot \ln\left(\frac{283}{273,15}\right) - 0,287 \cdot \ln\left(\frac{0,12}{0,101}\right) = -0,014 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$