

## Часть 1

# Техническая термодинамика

### Занятие 4

Эксергия. Термодинамические процессы в газах, парах и их смесях. Термодинамические процессы идеальных газов.

# ЭКСЕРГИЯ

(греч. ex-высокая степень; ergon-работа)

**- максимальная работа, которую может совершить ТД система при переходе из данного состояния в состояние термодинамического равновесия с окружающей средой при отсутствии иных, кроме окружающей среды источников теплоты (РАБОТОСПОСОБНОСТЬ)**

$$L_{\max} = \eta_t Q_1$$

**Максимальная работа – работа равновесного цикла Карно:**

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

$$L_{\max} = \left( 1 - \frac{T_2}{T_1} \right) Q_1$$

**Полезная работа цикла:  $L = Q_1 - Q_2$**

**Полученная  
теплота**

$$Q_1 = \Delta S_{\text{хол}} T_1$$

**Отданная теплота  
холодному источнику**

$$Q_2 = \Delta S_{\text{хол}} T_2$$

При равновесности:  $\Delta S_{\text{хол}} = \Delta S_{\text{гор}}$

$$L_{\text{max}} = Q_1 - \Delta S_{\text{гор}} T_1$$

Но при неравновесном процессе!!!

Потеря  
эксергии

$$\begin{aligned} \Delta L &= L_{\text{max}} - L = \\ &= Q_1 - \Delta S_{\text{гор}} T_1 - Q_1 + \Delta S_{\text{хол}} T_1 = \\ &= T_1 (\Delta S_{\text{хол}} - \Delta S_{\text{гор}}) \end{aligned}$$

Обозначив:  $\Delta S_{\text{хол}} - \Delta S_{\text{гор}} = \Delta S_{\text{сист}}$

Получим уравнение **Гюи-Стодолы** (1889):

француз-физик

словацкий теплотехник

$$\Delta L = T_0 \Delta S_{\text{сист}}$$

↑  
**Рассеивание  
энергии!**

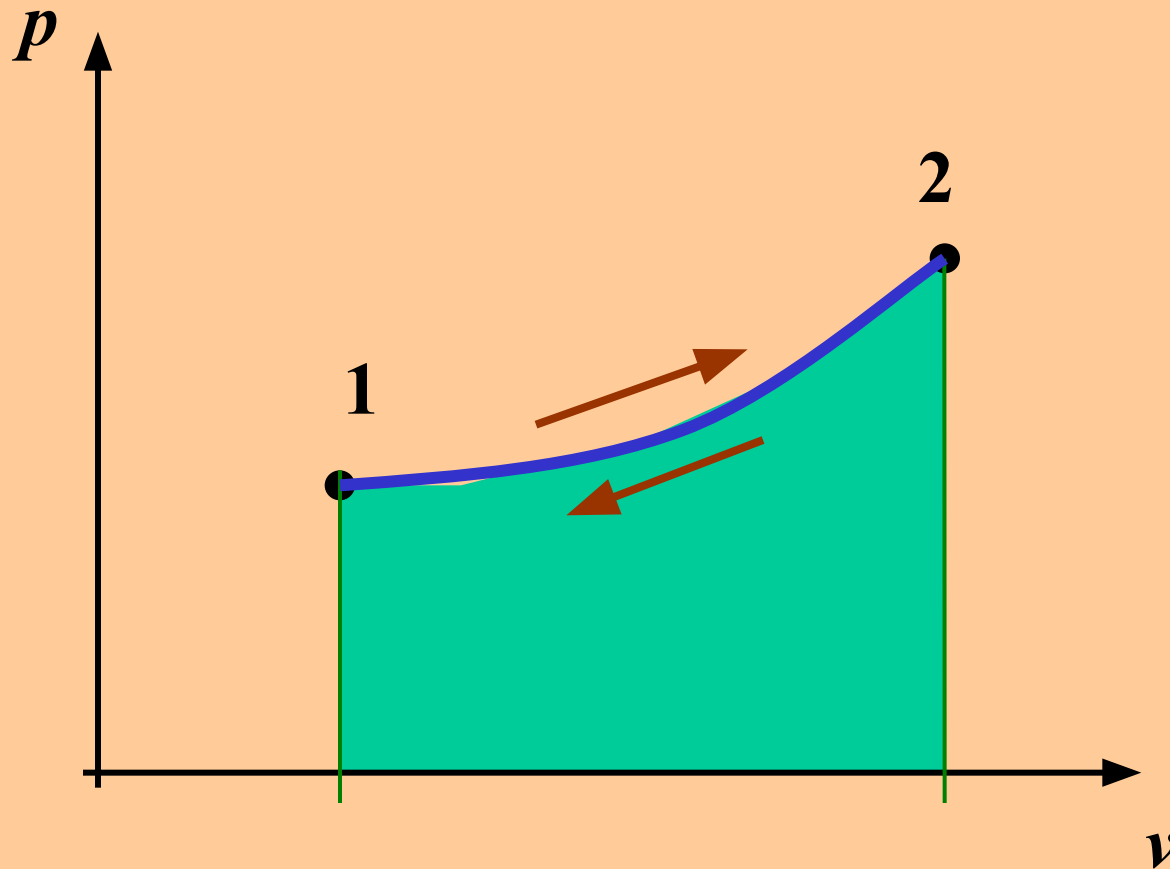
# Термодинамические процессы

↙  
**обратимые**

↘  
**необратимые**

**Процессы, после совершения которых в прямом, а потом в обратном направлении вся система тел, принимающих участие в процессе, возвращается в свое первоначальное состояние...**

# обратимость



$$|l_{1-2}| = |l_{2-1}|$$

Линии процессов подчиняются одному уравнению!

# Термодинамические процессы

равновесные

неравновесные

**Равновесный процесс** - процесс, в котором все параметры системы при его протекании меняются достаточно медленно по сравнению с процессом релаксации.



# Термодинамические процессы

**Введение понятия обратимых  
равновесных процессов  
упрощает расчеты и дает возможность  
получить приближенные результаты.**

# Основные термодинамические процессы

**Изохорный ( $v=\text{const}$ )**

**Изобарный ( $p=\text{const}$ )**

**Изотермический ( $T=\text{const}$ )**

**Адиабатный ( $S=\text{const}$ )**

**Политропный ( $n=\text{const}$ )**

(Греч.)

«изос» - равный

«терме» - теплота

«адиабатос» -

непроницаемый

«поли» - много

«тропос» - путь

# План исследования термодинамических процессов

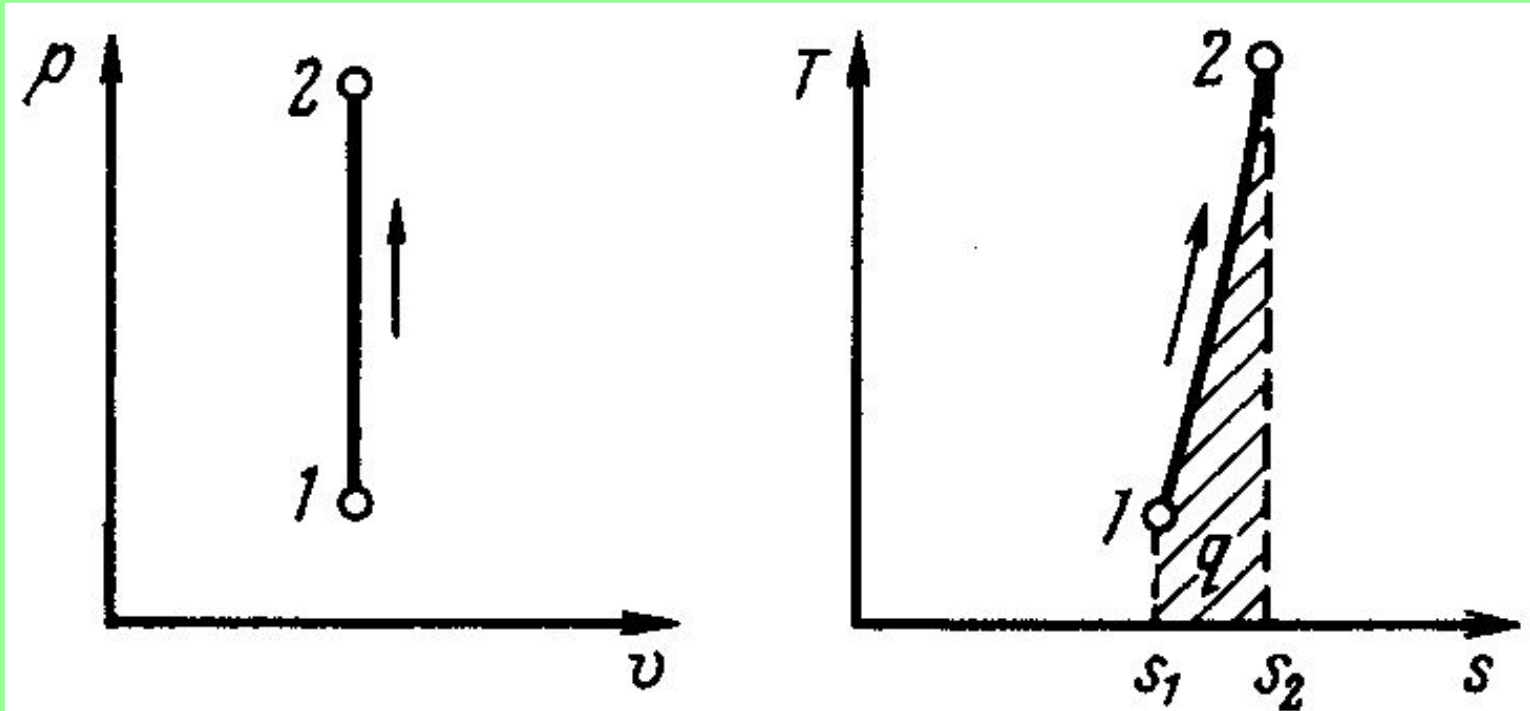
- 1) Закономерность изменения состояния газа (уравнение процесса, графическое отображение)
- 2)  $q$
- 3)  $\Delta u$
- 4)  $l$
- 5) Запись 1 закона ТД для процесса
- 6)  $\Delta i$
- 7)  $\Delta s$

# Изохорный процесс

1.

$$v = \text{const}$$

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$



2.

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

# Изохорный процесс

$$3. \quad \Delta u = c_v (T_2 - T_1)$$

$$4. \quad l = \int_{v_1}^{v_2} p dv = 0$$

$$5. \quad q = \overset{v_1}{\Delta u}$$

$$6. \quad \Delta i = c_p (T_2 - T_1)$$

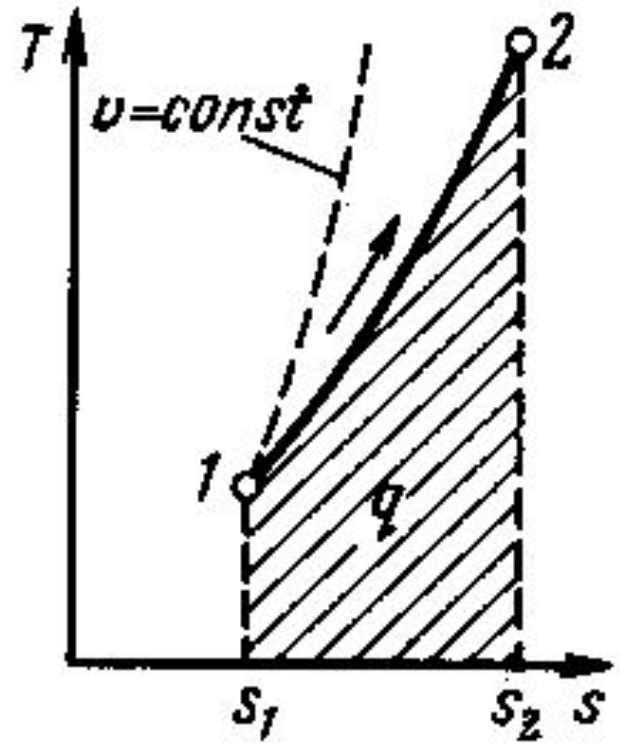
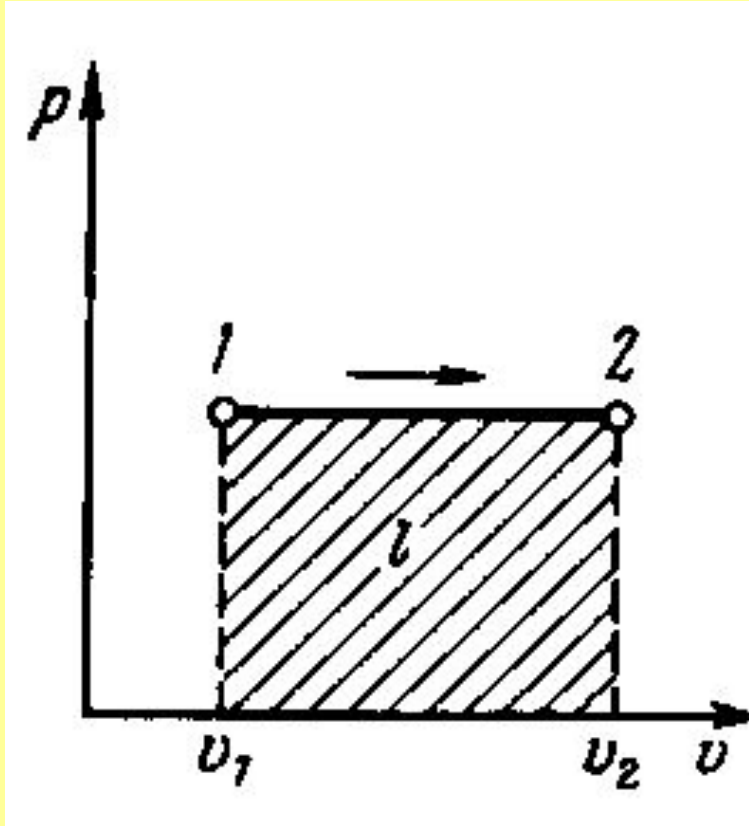
$$7. \quad \Delta S = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v \ln \frac{p_2}{p_1}$$

# Изобарный процесс

$$p = \text{const}$$

$$\frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2}$$

1.



2.

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

# Изобарный процесс

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

4.  $l = p(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1)$

5.  $q = \Delta u + l$

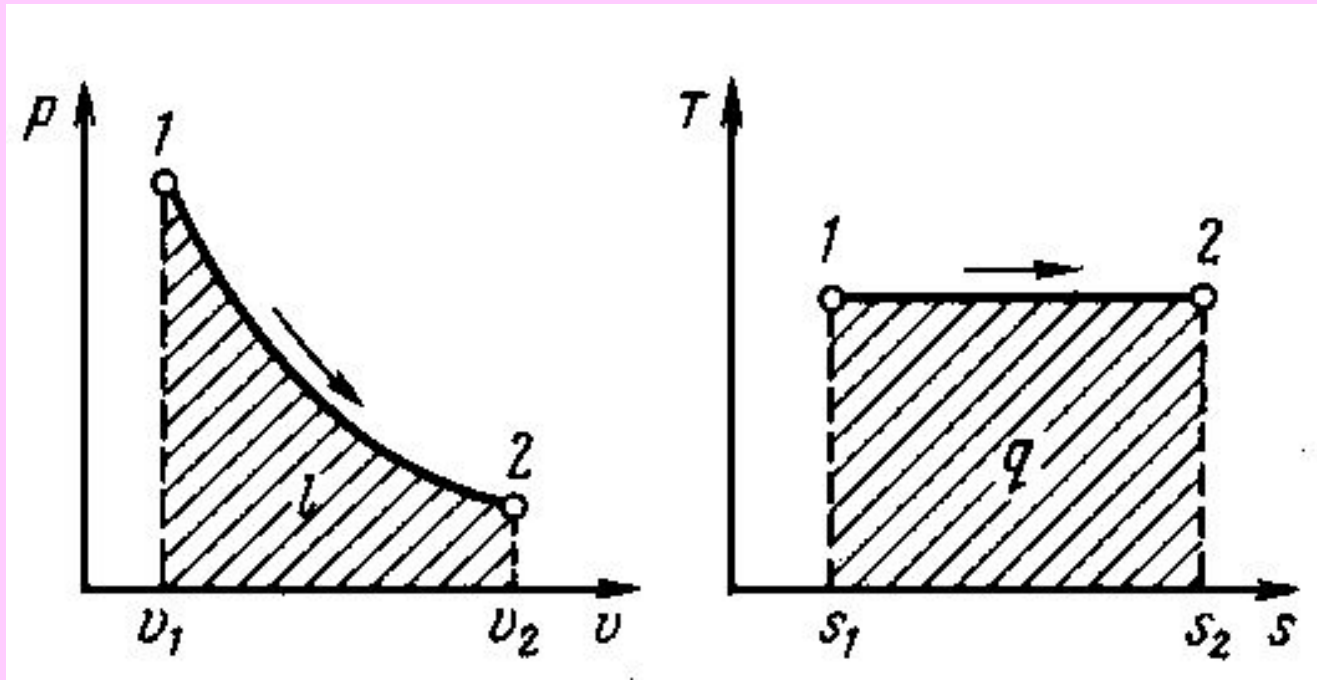
6.  $\Delta i = c_p (T_2 - T_1)$

7.  $\Delta S = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v \ln \frac{v_2}{v_1}$

# Изотермический процесс

1.

$$T = \text{const} \quad \frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1}{v_2}$$



2.

$$q = ?$$



# Изотермический процесс

3.  $\Delta u = 0$

4.  $l = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2}$

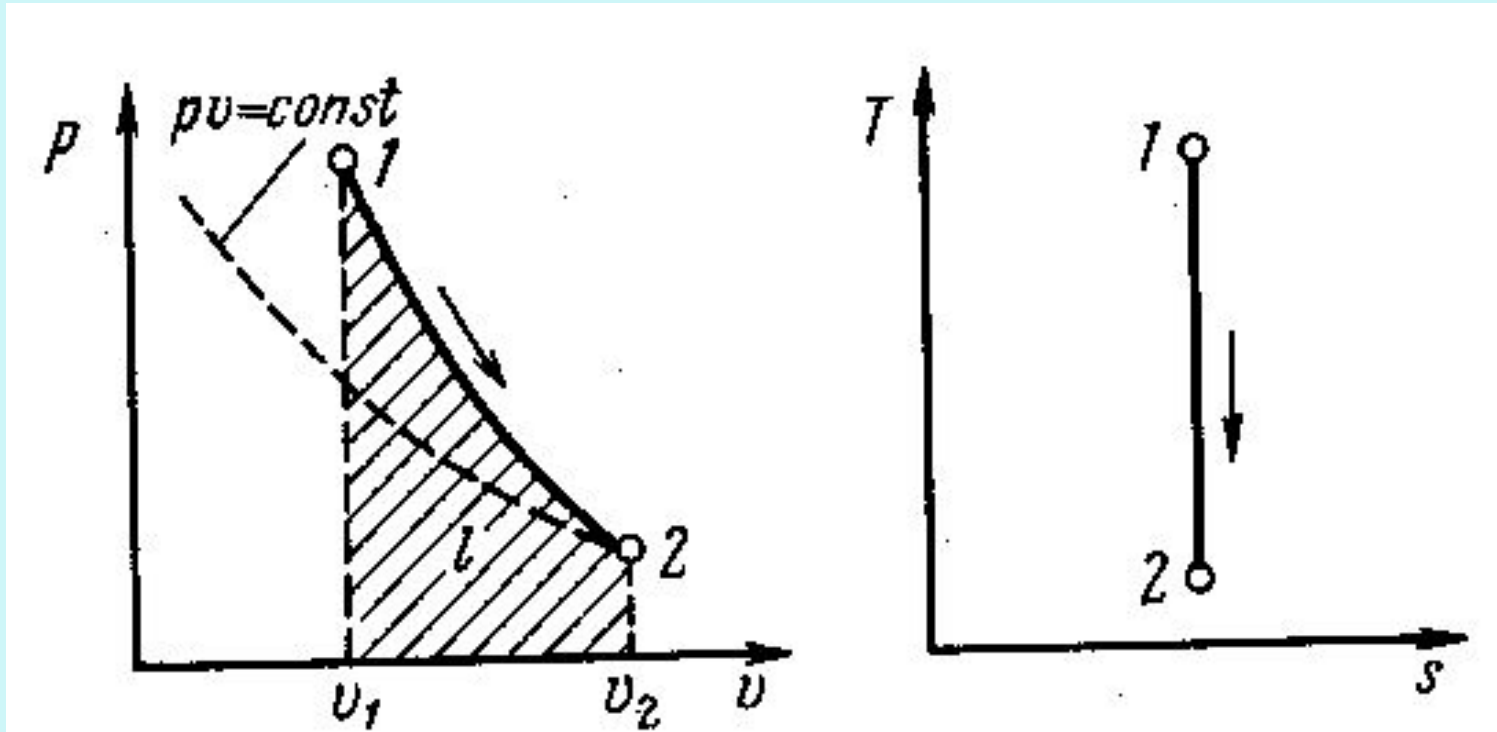
5.  $q = l$

6.  $\Delta i = 0$

7.  $\Delta S = R \ln \frac{p_1}{p_2} = R \ln \frac{v_2}{v_1}$

# Адиабатный процесс

1.  $dq = 0$      $pv^k = \text{const}$ ;  $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}$  ;  $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$



2.  $q = 0$

# Адиабатный процесс

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

4.  $l = c_v (T_1 - T_2) = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2) = \frac{1}{k-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2)$

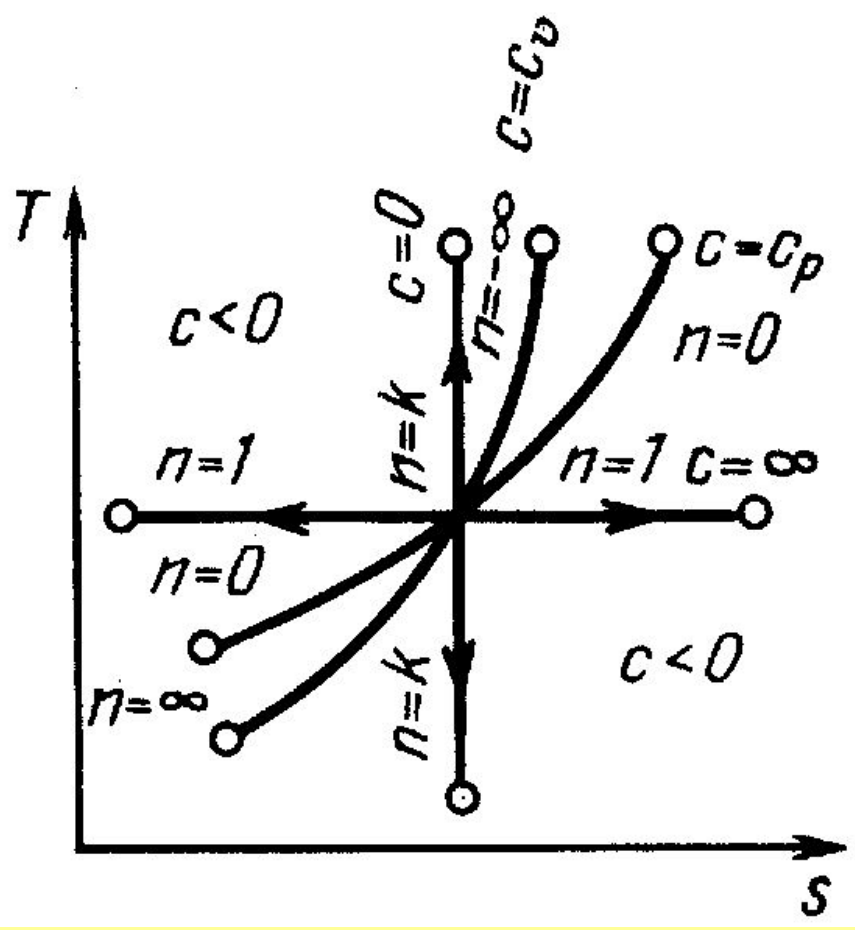
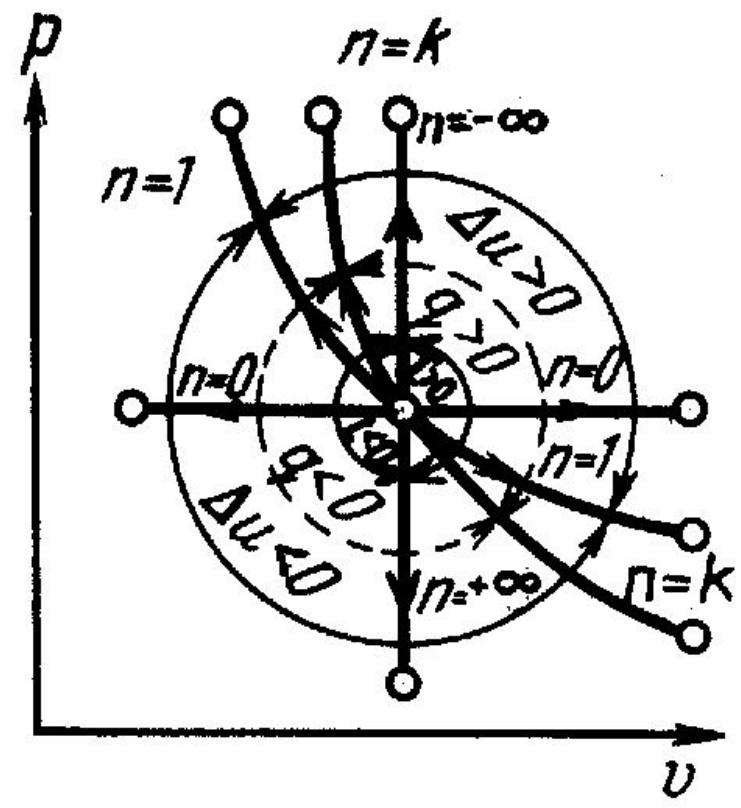
5.  $l = -\Delta u$

6.  $\Delta i = c_p (T_2 - T_1)$

7.  $\Delta S = 0$

# Политропный процесс

$$pv^n = const; \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}; \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$$



## Политропный процесс

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

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

4.  $l = \frac{1}{n-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2)$

5.  $q = \Delta u + l$

6.  $\Delta i = c_p (T_2 - T_1)$

7.  $\Delta S = c_n \ln \frac{T_2}{T_1}$

## Обобщающее значение политропного процесса

процесс	хар-ка	$n$	$c$
изохорный	$v=c$	$\pm\infty$	$c_v$
изобарный	$p=c$	$0$	$c_p$
изотермический	$T=c$	$1$	$\infty$
адиабатный	$s=c$	$k$	$0$
политропный	$n=c$	$n$	$c_v \frac{n-k}{n-1}$