

# Техническая термодинамика (1 часть)

1.3

A decorative graphic element consisting of several horizontal lines of varying lengths and colors (teal, light blue, white) extending from the right side of the slide.

# Уравнение Майера

- Энтальпия  $i = u + pv$
- Продифференцируем  $di = du + d(pv)$
- Разделим на  $T$

$$\frac{di}{dT} = \frac{du}{dT} + \frac{d(pv)}{dT} = \frac{du}{dT} + \frac{RdT}{dT}$$

$$R = \frac{di}{dT} - \frac{du}{dT} \quad R = c_p - c_v; \quad \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

- Для 1 кмолья

$$\mu c_p - \mu c_v = \mu R = 8,314; \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$$

# Энтропия

- Теплота не является функцией состояния (зависит от пути процесса)
- Умножаем теплоту на интегрирующий множитель

$$\frac{1}{T}$$

- И назовем  $\frac{\delta q}{T}$  ее приведенной теплотой

$$ds = \frac{\delta q}{T} = \frac{du}{T} + \frac{pdv}{T} = \frac{c_v dT}{T} + \frac{Rdv}{v}$$

$$\frac{p}{T} = \frac{R}{v}$$

- Приведенная теплота  $\frac{\delta q}{T}$  при обратимом изменении состояния газа полный дифференциал некоторой функции переменных  $T$  и  $v$
- Клаузиус назвал эту функцию энтропией и обозначил  $s$ ; Дж/(кг · К) или Дж/К
- Таким образом 
$$ds = \frac{\delta q}{T}$$

- Энтропия – функция состояния термодинамической системы, определяемая тем, что ее дифференциал  $dS$  при элементарном равновесном (обратимом) процессе, происходящем в этой системе, равен отношению бесконечно малого количества теплоты  $\delta Q$ , сообщенного системе, к термодинамической температуре системы

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad \text{Дж/К}$$

## II закон термодинамики

- I закон утверждает, что может

$$Q \rightarrow L \quad \text{и} \quad L \rightarrow Q$$

не устанавливая условий, при которых  
возможны эти превращения

- I закон не рассматривает вопрос о направлении теплового процесса, а не зная направления нельзя предсказать характер и результат

- Закон, позволяющий указать направление теплового потока и устанавливающий максимально возможный предел превращения  $Q \rightarrow L$  в тепловых машинах, представляет собой **II закон термодинамики**

**Постулат Клаузиуса:** Теплота не может переходить от холодного тела к более нагретому сама собой даровым процессом (без компенсации)

- **Томсон:** Не вся теплота, полученная от теплоотдатчика, может перейти в работу, а только некоторая ее часть, а другая часть теплоты должна перейти в теплоприемник

# Математическое выражение II закона термодинамики

$$ds \geq \frac{\delta q}{T}$$

- Оценка степени необратимости (несовершенства)
- Анализ процессов



# Изменение энтропии для любого термодинамического процесса

$$ds = \frac{\delta q}{T} = \frac{du}{T} + \frac{pdv}{T} = \frac{c_v dT}{T} + \frac{Rdv}{v}$$

$$\Delta s = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$ds = \frac{\delta q}{T} = \frac{di}{T} - \frac{vdp}{T} = \frac{c_p dT}{T} - \frac{Rdp}{p}$$

$$\Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

# Термодинамические процессы идеальных газов

- К основным процессам, имеющим большое значение как для теоретических исследований, так и для практических работ, относят
  - - изохорный ( $v\text{-const}$ ),
  - - изобарный ( $p\text{-const}$ ),
  - - изотермический ( $T\text{-const}$ ),
  - - адиабатный ( $q=0$ ).

- Кроме того существует группа процессов, являющихся при определенных условиях обобщающими для основных.
- Эти процессы называются политропными и характеризуются **постоянством теплоемкости** в процессе.

- Для всех процессов устанавливается общий метод исследований:
- 1) выводится уравнение кривой
- 2) устанавливается взаимосвязь между  $p$ ,  $v$ ,  $T$  в начале и конце процесса
- 3) определяется изменение внутренней энергии  $\Delta u$
- 4) вычисляется работа изменения объема  $l$
- 5) располагаемая (полезная) работа  $l'$
- 6) изменение энтальпии  $\Delta i$
- 7) количество теплоты  $q$
- 8) изменение энтропии  $\Delta s$

# Изохорный процесс

$$1) \frac{p}{T} = \text{const} \quad 2) \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

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

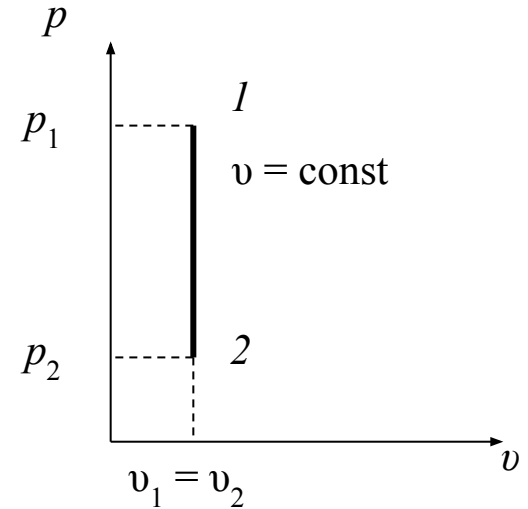
$$4) dl = pdv = 0 \quad l = 0$$

$$5) dl' = vdp \quad l' = v(p_2 - p_1)$$

$$6) dq = di - vdp \quad \Delta i = q + v(p_2 - p_1) = q + l'$$

$$7) dq = du + pdv = du \quad q = \Delta u = c_v(T_2 - T_1)$$

$$8) \quad \Delta s = c_v \ln \frac{T_2}{T_1}$$



# Изобарный процесс

$$1) \frac{v}{T} = \text{const} \quad 2) \frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2}$$

---

$$3) \Delta u = q - l$$

---

$$4) dl = p dv \quad l = p(v_2 - v_1)$$

---

$$5) dl' = v dp = 0 \quad l' = 0$$

---

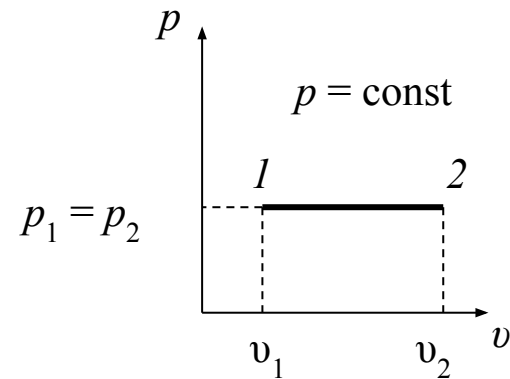
$$6) \Delta i = c_p (T_2 - T_1)$$

---

$$7) dq = di - v dp = di \quad q = \Delta i = c_p (T_2 - T_1)$$

---

$$8) \Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1}$$



# Изотермный процесс

$$1) \quad pv = const \qquad 2) \quad p_1 v_1 = p_2 v_2$$

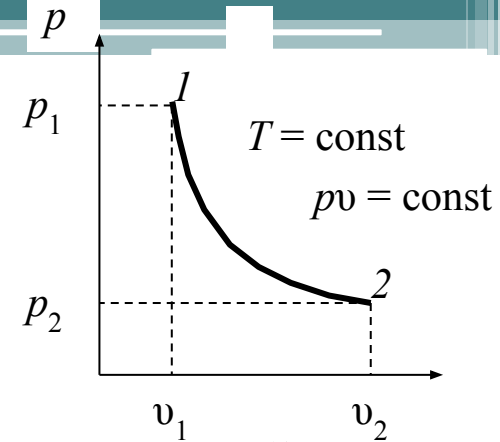
$$3) \quad du = c_v dT \qquad \Delta u = 0$$

$$4) \quad dl = pdv = \frac{RT}{v} dv \qquad l = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = p_1 v_1 \ln \frac{p_1}{p_2}$$

$$5) \quad dl' = vdp = \frac{RT}{p} dp \qquad l' = RT \ln \frac{p_1}{p_2} = p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$6) \quad di = c_p dT \qquad \Delta i = 0 \qquad 8) \quad \Delta s = R \ln \frac{v_2}{v_1} = R \ln \frac{p_1}{p_2}$$

$$7) \quad \left. \begin{aligned} dq &= du + pdv = pdv = dl \\ dq &= di - vdp = -vdp = dl' \end{aligned} \right\} q = l = l'$$



# Адиабатный процесс

1) Из уравнений 1 закона термодинамики получим

$$du + pdv = 0$$

$$di - vdp = 0$$

$$c_v dT + pdv = 0$$

$$c_p dT - vdp = 0$$

Разделим второе на первое уравнение

$$\frac{c_p dT}{c_v dT} = -\frac{vdp}{pdv}$$

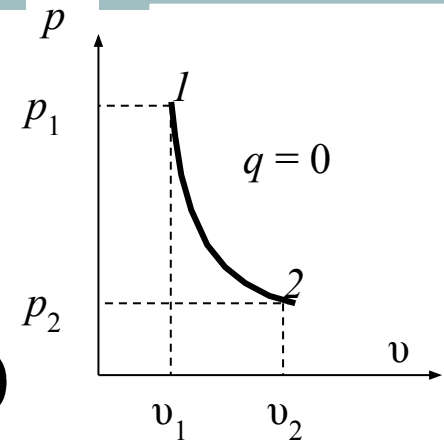
так как

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

то

$$\frac{l'}{l} = k$$

$$l' = kl$$





$$k = -\frac{vdp}{pdv}$$

$$k \frac{dv}{v} = -\frac{dp}{p}$$

проинтегрируем

$$k \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v} = - \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p}$$

$$k \ln \frac{v_2}{v_1} = -\ln \frac{p_2}{p_1} = \ln \frac{p_1}{p_2}$$

После потенцирования имеем

$$\left( \frac{v_2}{v_1} \right)^k = \frac{p_1}{p_2} \quad p_1 v_1^k = p_2 v_2^k$$

Откуда получаем уравнение адиабатного процесса (адиабаты)

$$pv^k = \text{const}$$

где  $k$  – показатель адиабаты

Газы	$k$
Одноатомные	1,67
Двухатомные	1,4
Трех- и многоатомные	1,29

$$2) \quad \frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^k \quad \frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

---

$$3) \quad du = -dl \quad \Delta u = -l$$

---

$$4) \quad dl = pdv \quad l = \frac{1}{k-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2)$$

$$l = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2)$$
$$l = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \right] \quad l = \frac{RT_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$$

$$5) \quad dl' = -vdp \quad l' = kl$$

$$l' = \frac{k}{k-1}(p_1 v_1 - p_2 v_2) \quad l' = \frac{k}{k-1} RT_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$$

$$l' = \frac{k}{k-1} R(T_1 - T_2) \quad l' = \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[ 1 - \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \right]$$

$$6) \quad di = -vdp = dl' \quad \Delta i = l'$$

$$7) \quad \begin{array}{l} dq = 0 \\ q = 0 \end{array} \quad \left| \quad 8) \quad ds = \frac{dq}{T} = 0 \quad \Delta s = 0 \quad s = \text{const}$$

Адиабатный процесс называют **ИЗОЭНТРОПНЫМ**

# Политропный процесс

Наряду с изобарным, изохорным, изотермическим и адиабатным процессами можно представить еще бесконечное множество процессов, у которых имеются другие постоянные признаки.

Всякий процесс идеального газа, в котором теплоемкость является постоянной величиной, называется **политропным**.

Из определения следует, что если основные термодинамические процессы (изобарный, изохорный, изотермический и адиабатный) протекают при постоянной теплоемкости, то они являются частными случаями политропного.

Для политропного процесса количество теплоты

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

$$dq = c_n dT$$

$$\begin{cases} dq = c_n dT = du + pdv \\ dq = c_n dT = di - vdp \end{cases}$$

$$\begin{cases} c_n dT = p dv & + \\ c_n dT = v dp & - \end{cases}$$

Перенесем слагаемые с теплоемкостями в правую сторону,  
вынесем  $dT$  за скобки,  
разделим второе уравнение на первое

$$\frac{c_n - p}{c_n - v} = - \frac{vdp}{pdv} \quad \text{обозначим } n = \frac{c_n - p}{c_n - v}$$

$$n = - \frac{vdp}{pdv} = \frac{l'}{l}$$

$$n = -\frac{vdp}{pdv}$$

$$n \frac{dv}{v} = -\frac{dp}{p}$$

$$n \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v} = - \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p}$$

проинтегрируем

$$n \ln \frac{v_2}{v_1} = -\ln \frac{p_2}{p_1} = \ln \frac{p_1}{p_2}$$

После потенцирования имеем

$$\left( \frac{v_2}{v_1} \right)^n = \frac{p_1}{p_2} \quad p_1 v_1^n = p_2 v_2^n$$

Откуда получаем уравнение политропного процесса (политропы)

$$pv^n = const$$

где  $n$  – показатель политропы

Из уравнений

$$n = \frac{c_n - p}{c_n - v} \quad \frac{c_p}{c_v} = k$$

Найдем теплоемкость политропного процесса

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

Показатель политропы и теплоемкость для процессов

### Для основных процессов

процесс	показатель политропы	теплоемкость
Изохорный	$n = \infty$	$c_n = c_v$
Изобарный	$n = 0$	$c_n = kc_v = c_p$
Изотермический	$n = 1$	$c_n = \infty$
Адиабатный	$n = k$	$c_n = 0$

$$2) \quad \frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^n \quad \frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

---

$$3) \quad \Delta u = c_v (T_2 - T_1) = \frac{n-1}{n-k} q = \frac{n-1}{1-k} l$$

---

$$4) \quad dl = p dv \quad l = \frac{1}{n-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2)$$

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

$$l = \frac{p_1 v_1}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \right]$$

$$l = \frac{RT_1}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$$



$$5) \quad dl' = -vdp \quad l' = nl$$

$$l' = \frac{n}{n-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2) \quad l' = \frac{n}{n-1} RT_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$$

$$l' = \frac{n}{n-1} R(T_1 - T_2) \quad l' = \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left[ 1 - \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \right]$$

---

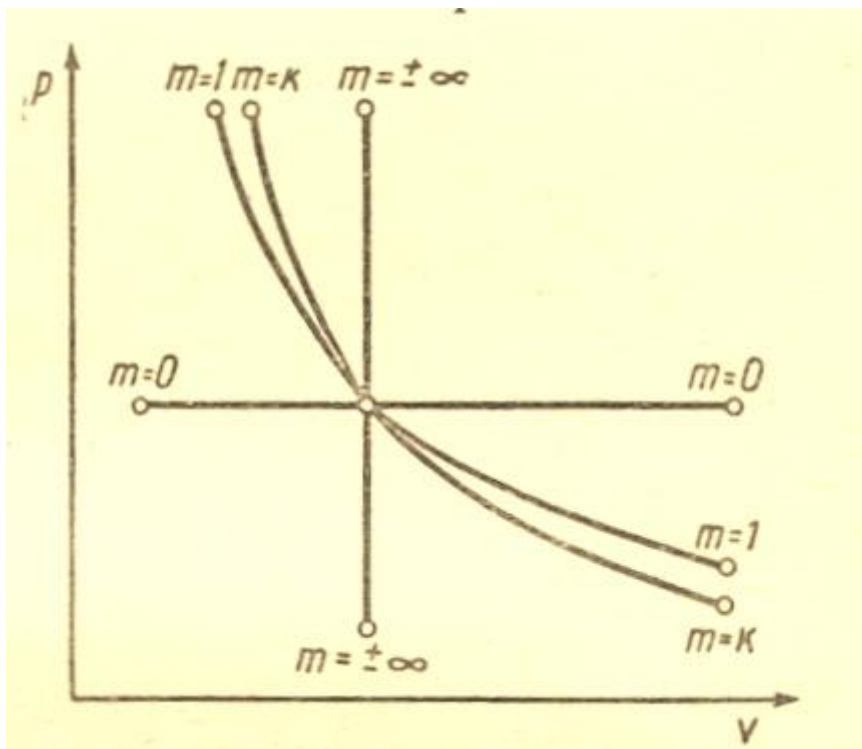
$$6) \quad \Delta i = c_p (T_2 - T_1)$$

$$7) \quad q = c_n (T_2 - T_1)$$

---

$$8) \quad ds = \frac{dq}{T} = \frac{c_n dT}{T}$$

$$\Delta s = c_n \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v \frac{n-k}{n-1} \ln \frac{T_2}{T_1}$$



$m$  или  $n$  на рис.  
показатель политропы

