Лекции по термодинамике
доцент каф. Э6, ктн Рыжков С.В.

Э нергомашиностроение.
6

Лекция №9
Диаграмма энтропия-температура

- Свойство системы координат энтропия-температура (sT).
- Основные процессы идеального газа в координатах sT.
- Диаграмма sT для идеального газа.
- Цикл Карно на диаграмме sT.
- Обобщенный (регенеративный) цикл Карно.
- Изменение энтропии идеального газа при постоянной теплоемкости.

Свойства системы координат энтропия-температура (*sT*)

$$ds = \frac{dq}{T} \qquad \Delta s = s_B - s_A = \int_A^B \frac{dq}{T}$$

$$q = \int_A^B T ds$$

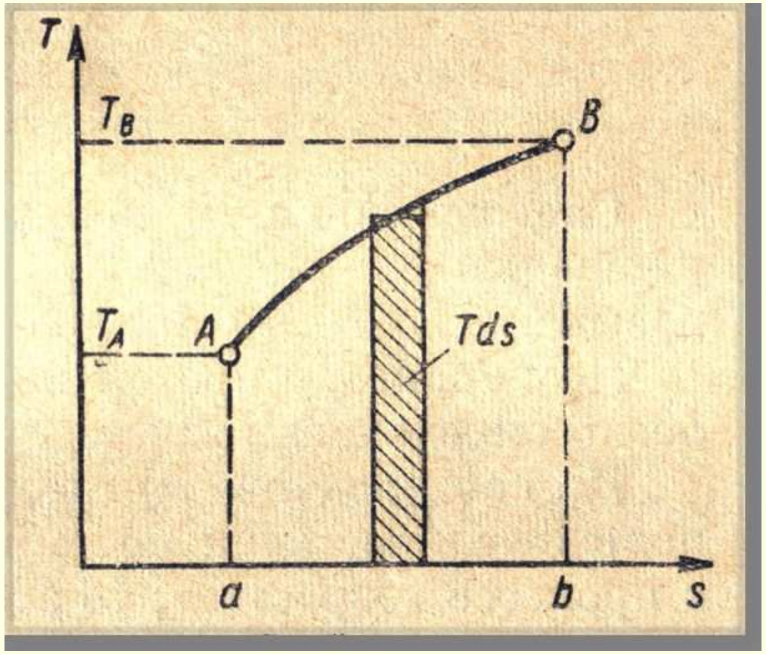

Рис. 1. Свойства системы координат sT

Следовательно, в координатах *sT* теплота представляется площадью под линией процесса. Поэтому часто диаграмму *sT* называют ***тепловой диаграммой.***

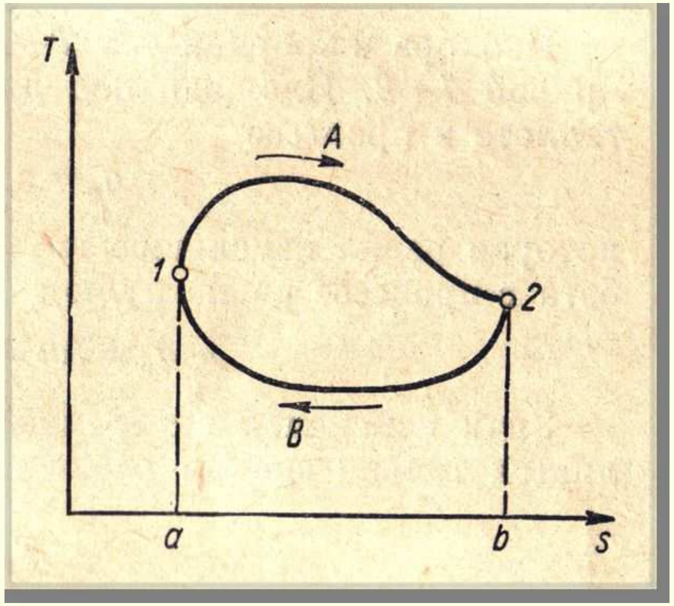

Рис. 2. Цикл координат sT

$$l = q_1 - q_2 \quad \eta_t = \frac{l}{q_1} = \frac{пл.1A2B1}{пл.a1A2b}$$

Координаты *sT* с нанесенными на них графиками простейших процессов для данного рабочего тела называют ***диаграммой sT этого тела***. Простейшей тепловой диаграммой будет диаграмма для идеального газа. Для построения этих диаграмм необходимо рассмотреть основные процессы идеального газа в координатах *sT*.

Основные процессы идеального газа в координатах *sT*

Изохорный процесс.

$$ds = \frac{c_v dT}{T}$$

$$\Delta s_v = s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{c_v dT}{T}$$

$$\Delta s_v = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} \qquad (1)$$

$$\Delta s_v = 2{,}3 c_v \lg \frac{T_2}{T_1} \qquad (2)$$

$$q_v = c_v (T_2 - T_1)$$

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

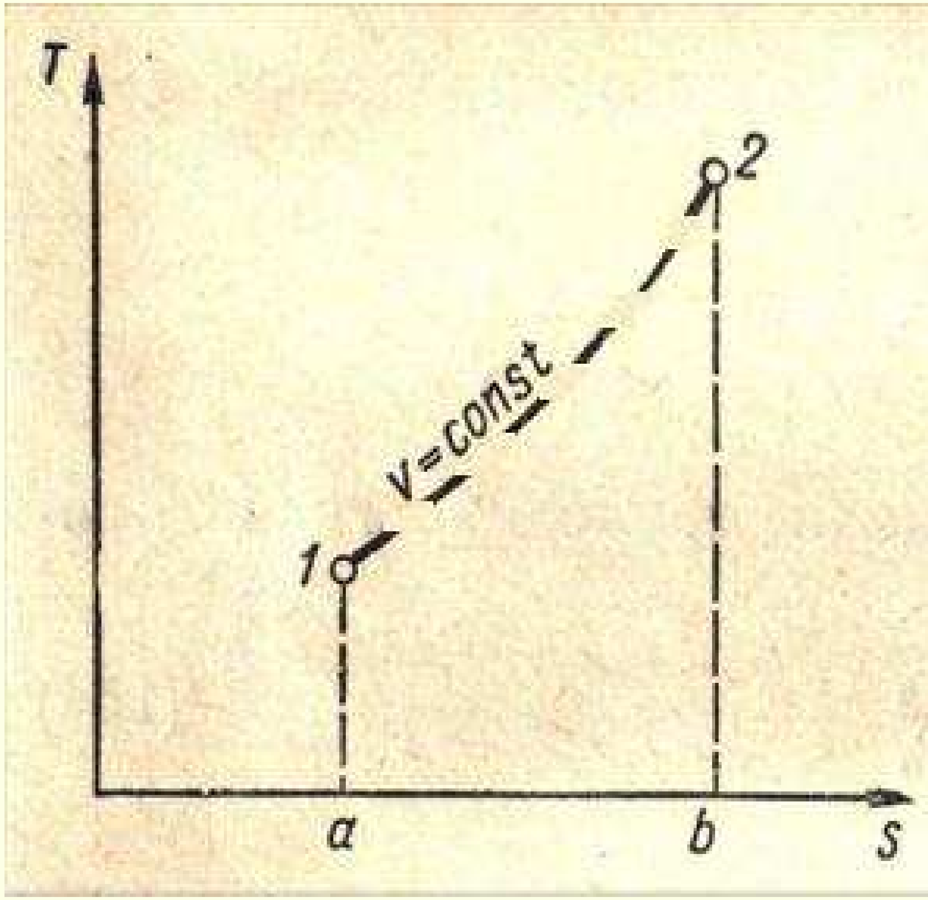

Рис. 3. Изохорный процесс идеального газа

Изобарный процесс.

$$dq_p = c_p dT$$

$$ds = \frac{c_p dT}{T}$$

$$\Delta s_p = s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{c_p dT}{T}$$

$$\Delta s_p = c_p \ln\frac{T_2}{T_1}; \Delta s_p = 2{,}3 c_p \lg\frac{T_2}{T_1} \quad \text{(3),(4)}$$

$$q_p = c_p (T_2 - T_1); \Delta s_p = c_p \ln\frac{T_2}{T_1}; \Delta s_v = c_v \ln\frac{T_2}{T_1}$$

$$\frac{\Delta s_p}{\Delta s_v} = \frac{c_p \ln\frac{T_2}{T_1}}{c_v \ln\frac{T_2}{T_1}} = \frac{c_p}{c_v} = k > 1$$

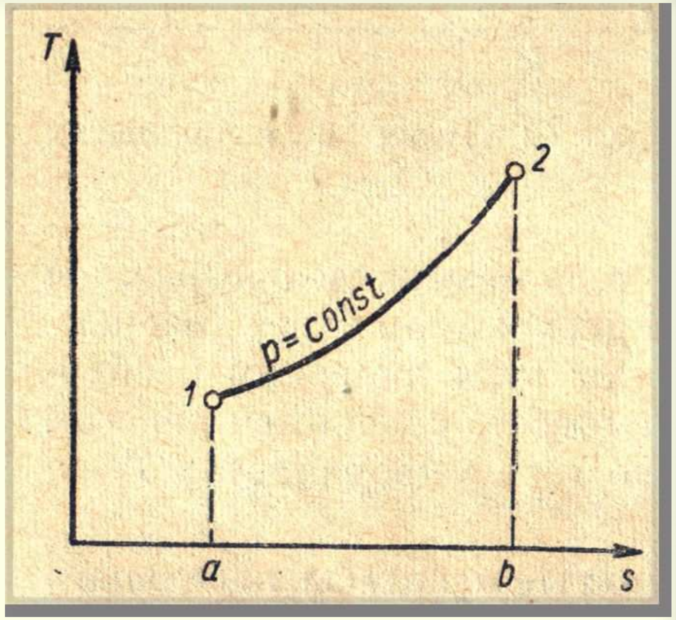

Рис. 4. Изобарный процесс идеального газа

Изотермический процесс (T=const)

$$dq = pd\upsilon; ds = \frac{pd\upsilon}{T}$$

$$\frac{p}{T} = \frac{R}{\upsilon}; ds = R\frac{d\upsilon}{\upsilon}$$

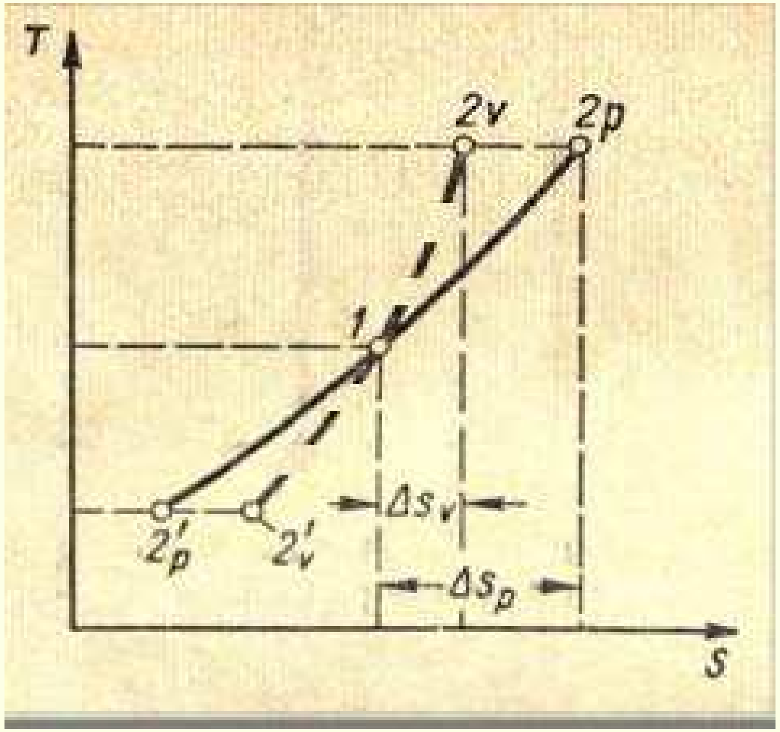

Рис. 5. Совместное изображение изобарного и изохорного процессов идеального газа

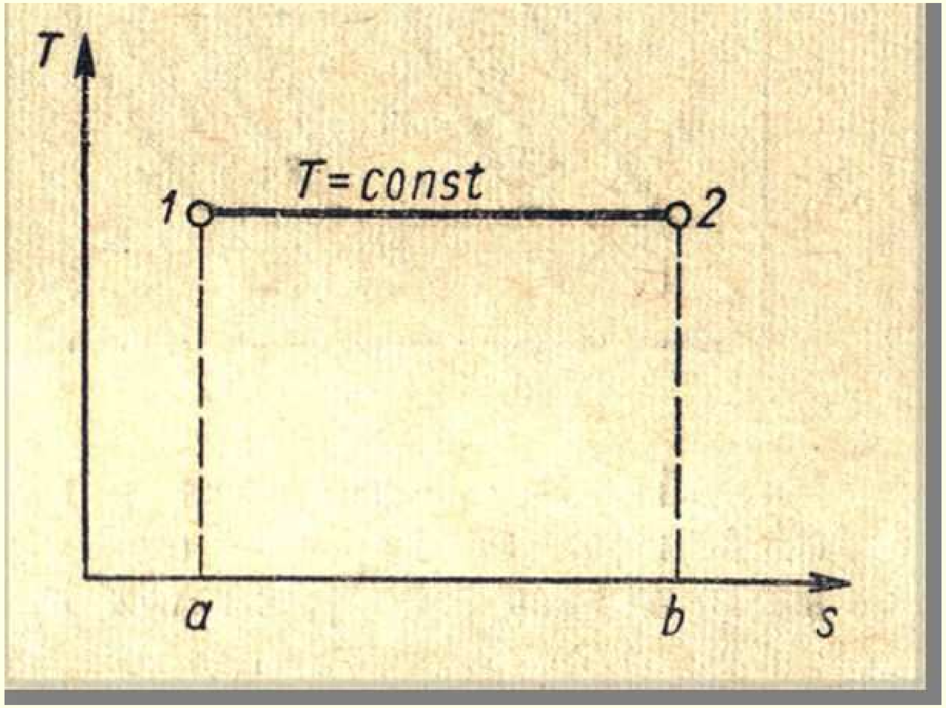

Рис. 6. Изотермический процесс

$$s_2 - s_1 = \Delta s_T = R\ln\frac{\upsilon_2}{\upsilon_1} \quad (5)$$

$$\Delta s_T = 2,3R\lg\frac{\upsilon_2}{\upsilon_1} \quad (6)$$

$$\Delta s_T = 2,3R\lg\frac{p_1}{p_2} \quad (7)$$

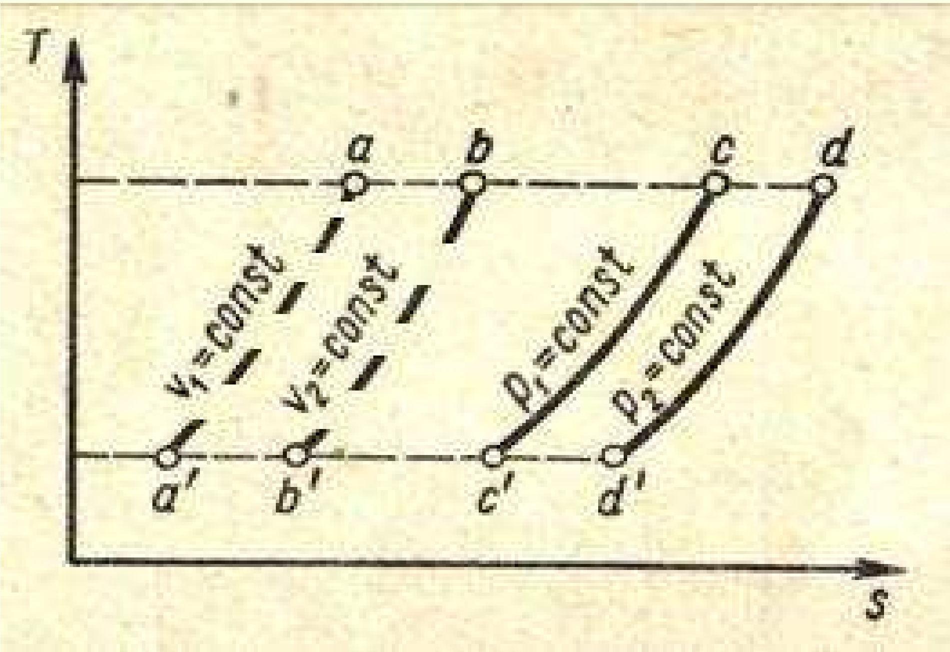

Рис. 7. Доказательство эквидистантности изохор и изобар идеального газа

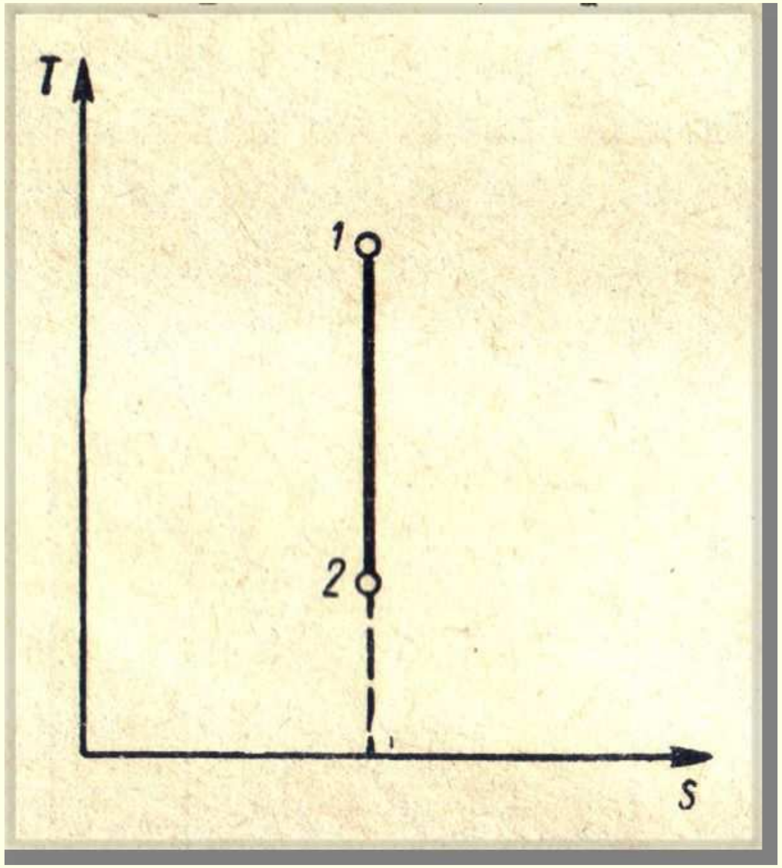

Рис. 8. Адиабатный процесс

$$\Delta s_T = R \ln \frac{\upsilon_2}{\upsilon_1} = ab = a'b'$$

$$\Delta s_T = R \ln \frac{p_1}{p_2} = cd = c'd'$$

$$ds = \frac{dq}{T}$$

Для адиабатного процесса $dq = 0$, поэтому $ds = 0$. Отсюда следует, что обратимый адиабатный процесс характеризуется постоянством энтропии s = const. На этом основании такой процесс часто называют ***изоэнтропным.***

Диаграмма *sT* для идеального газа

На рис. 9 приведен пример общего вида части диаграммы для газа, подчиняющегося уравнению состояния газа. Сплошными горизонтальными и вертикальными линиями нанесены соответственно изотермы и адиабаты. Начало координат по оси энтропии (ось абсцисс) выбирается условно.

Сплошные логарифмические кривые представляют собой изобары. При этом изобары, соответствующие большим давлениям, располагаются ближе к оси ординат, т. е. $Pn > P_1$

Пунктирными логарифмическими кривыми нанесены изохоры. Изохоры, расположенные ближе к оси ординат, соответствуют меньшим объемам, т. е. $v_n < v_1$.

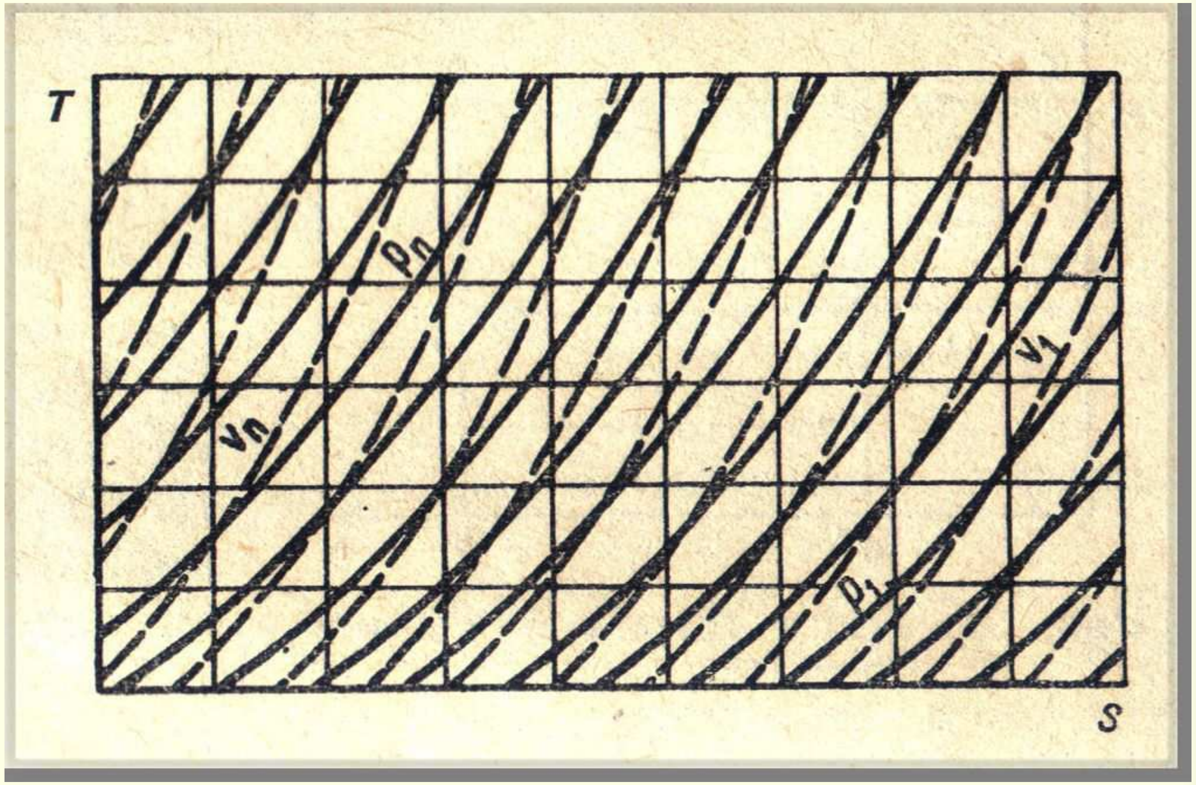

Рис. 9. Диаграмма идеального газа

Цикл Карно на диаграмме *sT*

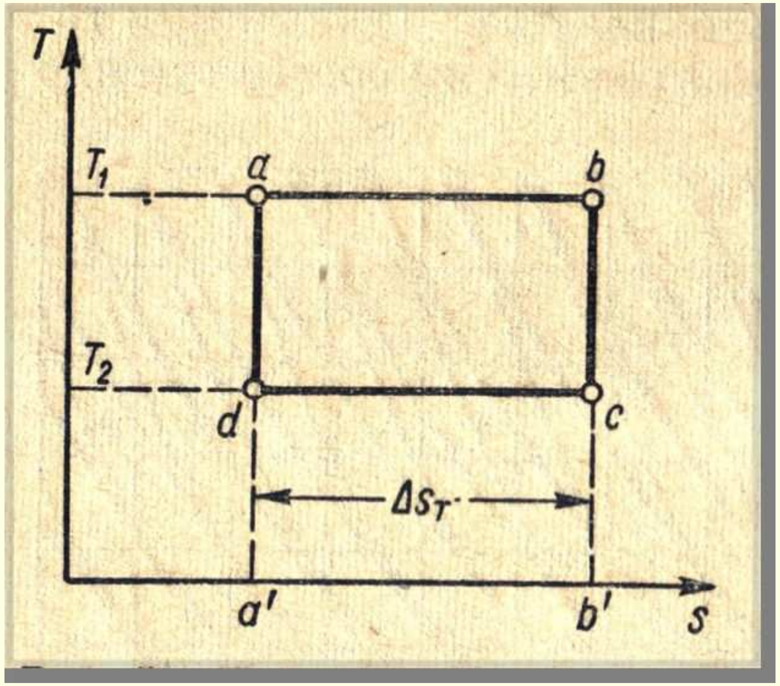

Рис. 10. Цикл Карно

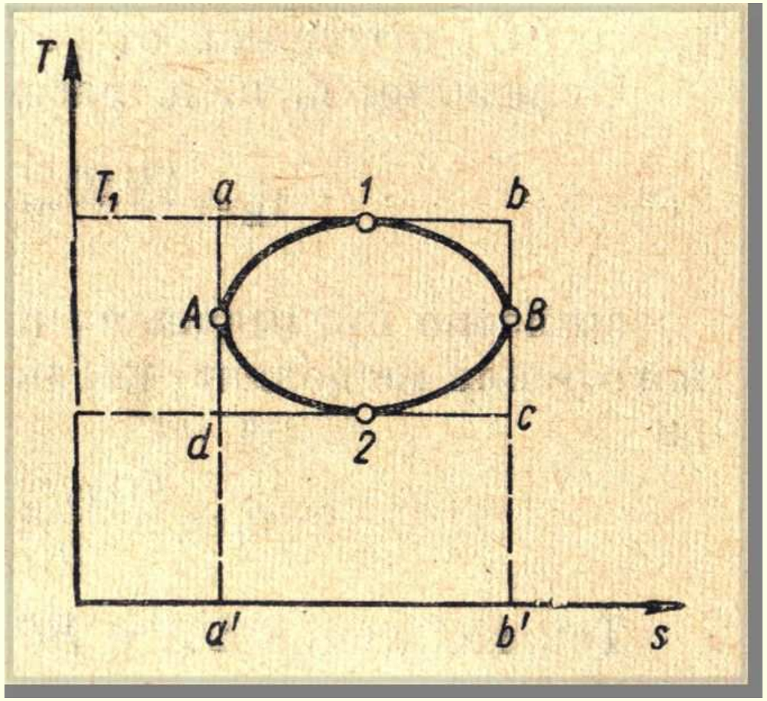

Рис. 11. Сравнение цикла Карно с произвольным циклом

$$l = q_1 - q_2 = (T_1 - T_2)\Delta s_T$$

$$\eta_t = \frac{l}{q_1} = \frac{(T_1 - T_2)\Delta s_T}{T_1 \Delta s_T} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}; \qquad \Delta s_T = R \ln \frac{\upsilon_2}{\upsilon_1}$$

$$\eta_{tk} = \frac{l_k}{q_{1k}} = \frac{пл.abcda}{пл.a^{'}abb^{'}}$$

$$\eta_t = \frac{l}{q_1} = \frac{пл.abcda - [пл.Aa1A + пл.1bB1 + пл.Bc2B + пл.2dA2]}{пл.a^{'}abb^{'} - [пл.Aa1A + пл.1bB1]}$$

Обобщенный (регенеративный) цикл Карно

Тела, воспринимающие в процессе *BC* теплоту от рабочего тела и возвращающие ему эту теплоту в процессе *DA,* называют ***регенераторами***.

$$\eta_t = \frac{(q_{1(T)} + q_{1(p)}) - (q_{2(T)} + q_{2(p)})}{q_{1(T)} + q_{1(p)}}$$

$$\eta_t = \frac{q_{1(T)} - q_{2(T)}}{q_{1(T)}} = \frac{T_1 \Delta s_1 - T_2 \Delta s_2}{T_1 \Delta s_1}$$

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

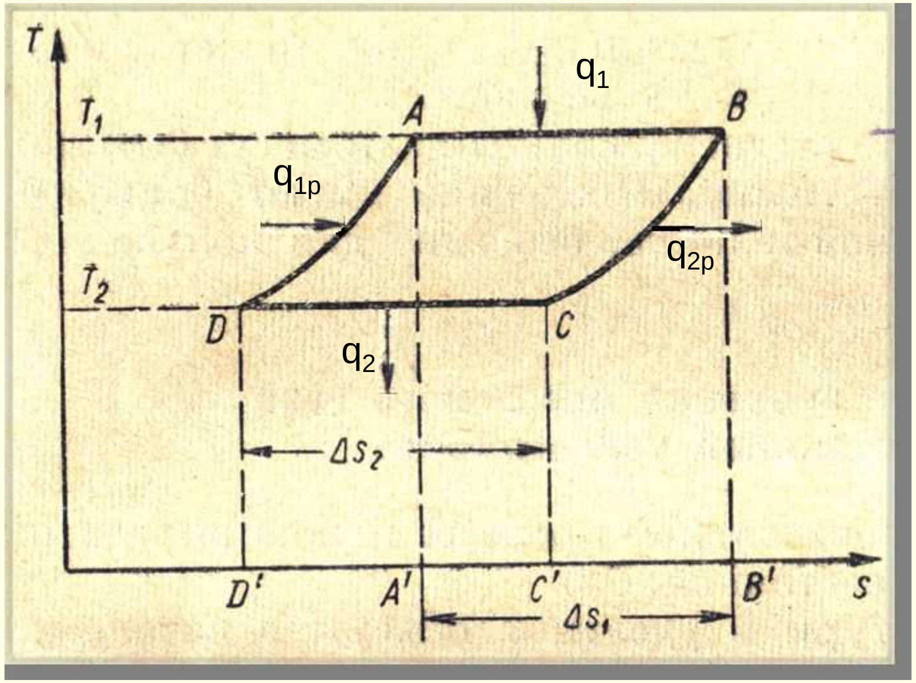

Рис. 12. Обобщенный цикл Карно

Таким образом, к. п. д. обратимого цикла, состоящего из двух изотерм и двух произвольных процессов, представляемых эквидистантными линиями(DA и BC), в точности равен к. п. д. цикла Карно. На этом основании такой цикл называют ***обобщенным циклом Карно***.

Изменение энтропии идеального газа при постоянной теплоемкости

$$dq = c_\upsilon dT + p d\upsilon$$

$$\frac{dq}{T} = c_\upsilon \frac{dT}{T} + \frac{p}{T} d\upsilon = ds$$

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

$$ds = c_\upsilon \frac{dT}{T} + R \frac{d\upsilon}{\upsilon} \qquad (8)$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_\upsilon \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{\upsilon_2}{\upsilon_1} \qquad (9)$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = 2{,}3 c_\upsilon \lg \frac{T_2}{T_1} + 2{,}3 R \lg \frac{\upsilon_2}{\upsilon_1} \qquad (10)$$

$$p d\upsilon + \upsilon dp = RdT$$

$$\frac{d\upsilon}{\upsilon} + \frac{dp}{p} = \frac{RdT}{p\upsilon}$$

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

$$\frac{d\upsilon}{\upsilon} + \frac{dp}{p} = \frac{dT}{T} \qquad (11)$$

$$ds = c_\upsilon\left(\frac{d\upsilon}{\upsilon} + \frac{dp}{p}\right) + R\frac{d\upsilon}{\upsilon} = (c_\upsilon + R)\frac{d\upsilon}{\upsilon} + c_\upsilon\frac{dp}{p}$$

$$c_\upsilon + R = c_p \qquad ds = c_p\frac{d\upsilon}{\upsilon} + c_\upsilon\frac{dp}{p}$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_p \ln\frac{\upsilon_2}{\upsilon_1} + c_\upsilon \ln\frac{p_2}{p_1} \qquad (12)$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = 2{,}3 c_p \lg\frac{\upsilon_2}{\upsilon_1} + 2{,}3 c_\upsilon \lg\frac{p_2}{p_1} \qquad (13)$$

$$ds = c_\upsilon \frac{dT}{T} + R\frac{d\upsilon}{\upsilon}$$

$$\frac{d\upsilon}{\upsilon} = \frac{dT}{T} - \frac{dp}{p} \qquad (14)$$

$$ds = c_\upsilon \frac{dT}{T} + R\cdot\left(\frac{dT}{T} - \frac{dp}{p}\right) = (c_\upsilon + R)\frac{dT}{T} - R\frac{dp}{p}$$

$$c_p = c_\upsilon + R$$

$$ds = c_p \frac{dT}{T} - R\frac{dp}{p}$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_p \ln\frac{T_2}{T_1} - R\ln\frac{p_2}{p_1} \qquad (15)$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = 2,3c_p \lg\frac{T_2}{T_1} - 2,3R\lg\frac{p_2}{p_1} \qquad (16)$$

Контрольные вопросы

- Свойство системы координат энтропия-температура (sT)
- Основные процессы идеального газа в координатах sT
- Диаграмма sT для идеального газа
- Цикл Карно на диаграмме sT
- Обобщенный (регенеративный) цикл Карно
- Изменение энтропии идеального газа при постоянной теплоемкости