

Лекция № 3

Второе начало термодинамики

**Алексей Викторович
Гуденко**

17/09/2012

План лекции

1. Второе начало термодинамики. Необратимость тепловых процессов
2. Расширение идеального газа в пустоту
3. Энтропия: термодинамическое и статистическое определения. Закон возрастания энтропии.
4. Энтропия идеального газа. Возрастание энтропии при смешении газов.
5. Тепловые машины. Цикл Карно.

Необратимые процессы

- Трение – работа переходит в тепло. Тепло в работу полностью превратить нельзя.
- Теплообмен между горячим и холодным телом.
- Расширение газа в пустоту.
- Диффузия – процесс необратимый: сахар в чае никогда не соберётся в кусок.

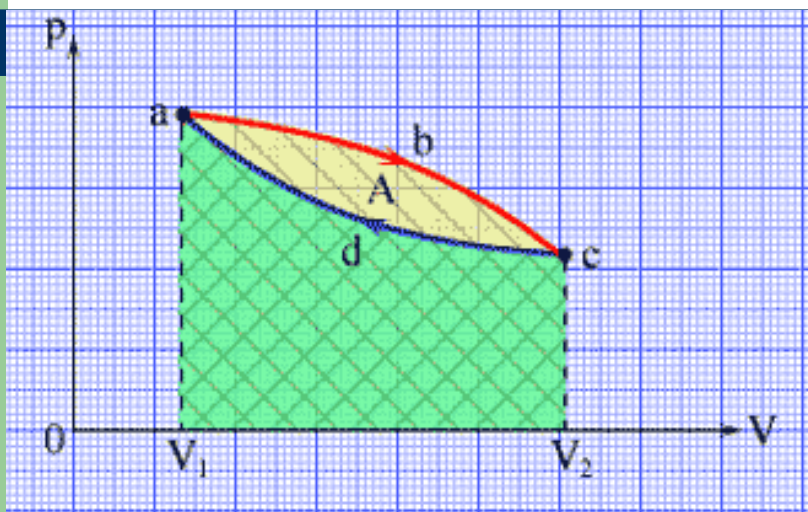
Второе начало термодинамики

- Невозможен процесс, единственным результатом которого была бы передача теплоты от тела холодного к телу горячему. (Р. Клаузиус, 1850 г.)
- Невозможен круговой процесс, единственным результатом которого было бы производство работы за счёт охлаждения теплового резервуара (В. Томсон (лорд Кельвин), 1851 г.)
- Невозможно построить периодически действующую машину, единственным результатом которой было бы поднятие груза за счёт охлаждения теплового резервуара (Планк)
- Невозможен вечный двигатель второго рода (т.е. двигатель, работающий только за счёт охлаждения теплового резервуара). (В. Оствальд)

Эквивалентность формулировок

- Невозможен процесс Клаузиуса \equiv
- Невозможен процесс Томаса-Планка
- Доказательство:
 - Допустим удалось поднять тело, превратив тепло, полученное от одного теплового резервуара в работу. Тело падает и нагревает более горячее тело: получили невозможный процесс Клаузиуса.

Схема тепловой и холодильной машины



Коэффициент полезного действия
тепловой машины

$$\eta = A/Q_H = (Q_H - Q_x)/Q_H$$

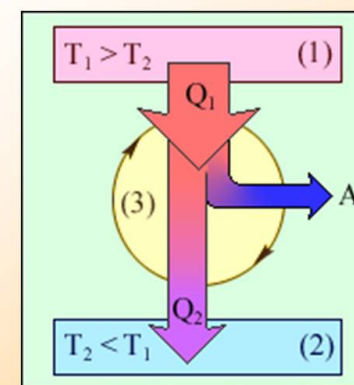
Коэффициент эффективности
холодильной машины

$$\eta_x = Q_x/A = Q_x/(Q_H - Q_x)$$

Коэффициент эффективности теплового
насоса

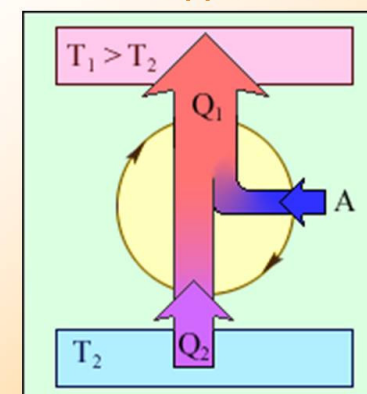
$$\eta_T = Q_H/A = Q_H/(Q_H - Q_x)$$

Тепловая машина



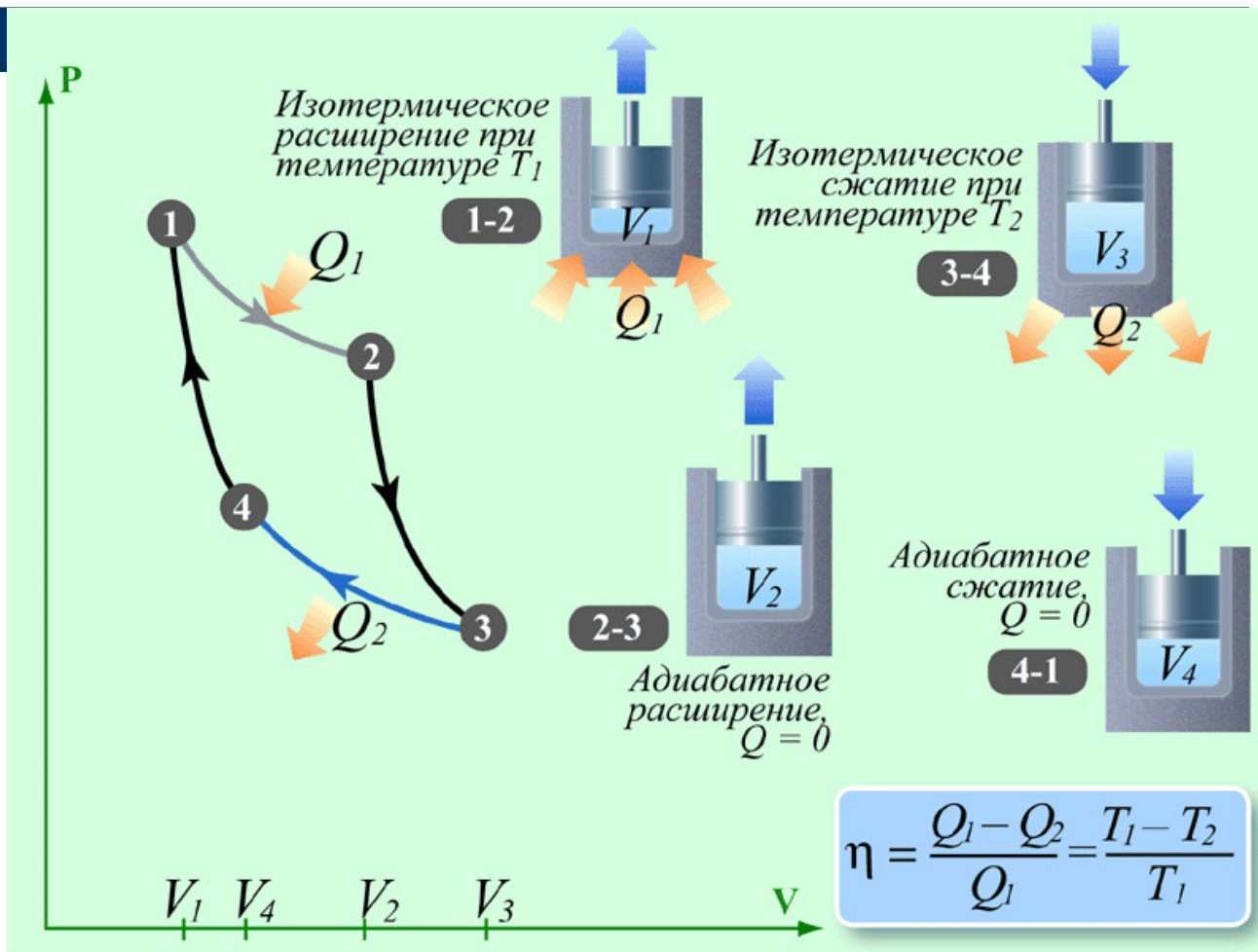
[назад](#)

Холодильник



[назад](#)

Цикл Карно: две изотермы – две адиабаты



Что такое тепловая машина

- Назначение тепловой машина – превращать тепло в механическую работу
- Циклически действующую тепловую машину можно создать только за счёт неравновесной системы тел (второе начало термодинамики)
- Максимальную работу даёт обратимая машина. В обратимой машине:
 1. нет теплообмена между горячим и холодным телом
 2. нет процессов расширения в пустоту
- Машина Карно:
 1. нагреватель с T_H
 2. холодильник T_X
 3. рабочее тело.
- Единственный обратимый процесс для машины Карно – цикл Карно: две изотермы + две адиабаты
- В таком цикле энтропия системы не изменяется:
 $\Delta S = \Delta S_H + \Delta S_X = 0$

Энтропия.

Термодинамическое определение.

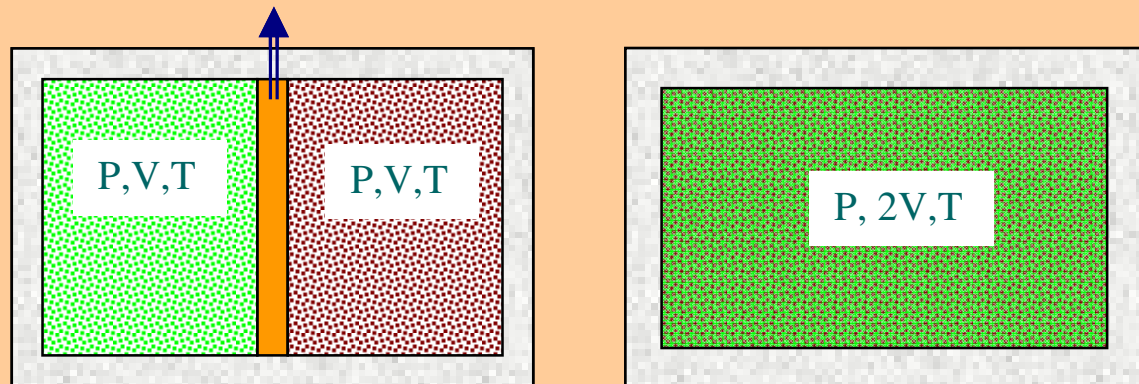
Закон возрастания энтропии.

- **Термодинамическое определение.**
Изменение энтропии при обратимом переходе из одного состояния в другое равно приведённому количеству теплоты:
 $dS = \delta Q/T$; $\Delta S = \int \delta Q/T$
- **При любых процессах, протекающих в термодинамических изолированных системах, энтропия либо остаётся неизменной, либо возрастает: $\Delta S \geq 0$.**
- В состоянии равновесия энтропия замкнутой системы достигает максимума и никакие макроскопические процессы в такой системе невозможны.

Энтропия идеального газа

- $TdS = C_V dT + PdV \Rightarrow TdS = C_V dT/T + P/TdV$
 $= C_V dT/T + R/VdV \Rightarrow$
- $S = S(V, T) = C_V \ln T + R \ln V + \text{const}$
- $S = S(P, T) = C_P \ln T - R \ln P + \text{const}$
- $S = S(P, V) = C_V \ln P + C_P \ln V + \text{const}$

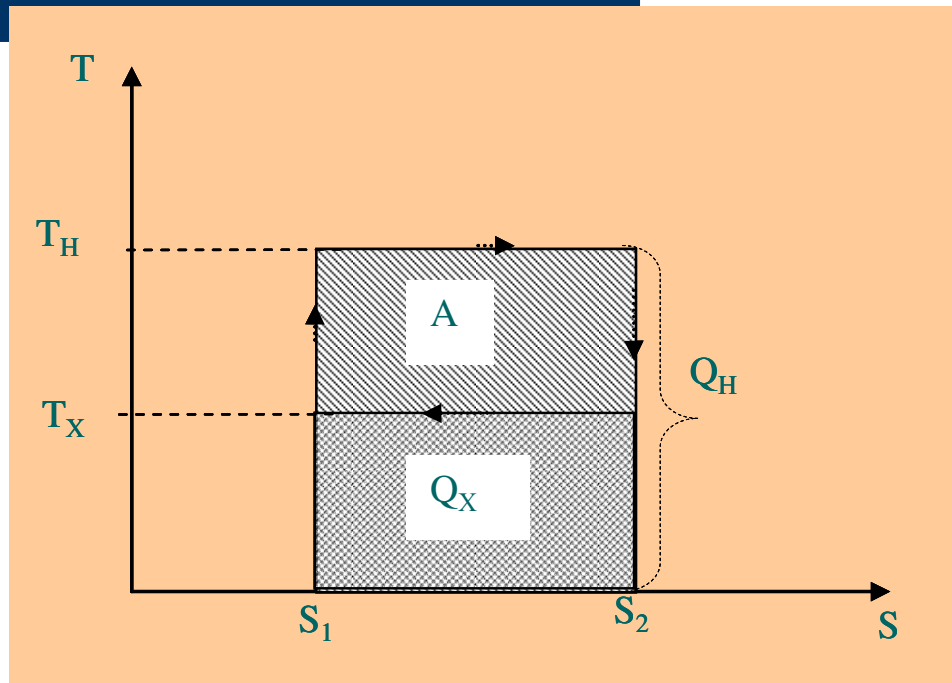
Возрастание энтропии при смешении газов



- $\Delta S_1 = R \ln 2V/V = R \ln 2$
- $\Delta S_2 = R \ln 2V/V = R \ln 2 \Rightarrow$
- $\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = 2R \ln 2 > 0 \Rightarrow$ процесс смешения необратимый
- $\Delta S = 0$, если газы одинаковые

Цикл Карно в координатах (S,T)

- $Q_H = T_H \Delta S$ – теплота, полученная от нагревателя
- $Q_X = T_X \Delta S$ – теплота, отданная холодильнику
- $A = Q_H - Q_X = (T_H - T_X) \Delta S = \Delta T \Delta S$ – работа
- $\eta = A/Q_H = \Delta T/T_H$ - коэффициент полезного действия



Второе начало термодинамики – закон возрастания энтропии

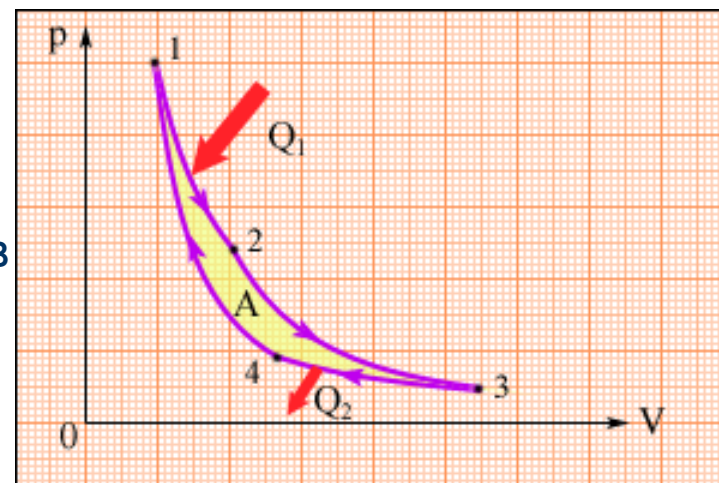
- В замкнутой системе энтропия S при любом реальном процессе либо возрастает, либо остаётся неизменной, т.е. изменение энтропии $dS \geq 0$; знак равенства имеет место для обратимых процессов.
- В состоянии равновесия энтропия замкнутой системы достигает максимума и никакие макроскопические процессы в такой системе невозможны.

Энтропия – мера вероятности. Статистическое определение.

- По формуле Больцмана
 $S = k \ln G$
- G – число способов, которым может быть реализовано данное макроскопическое состояние системы (статистический вес или термодинамическая вероятность состояния системы).
- Закон возрастания энтропии – соответствует переходу системы в более вероятное состояние. Максимально вероятным является состояние равновесия.

КПД машины Карно $\eta = A/Q_H = (1 - T_x/T_H)$

- Изотерма 1-2: (вся теплота идёт на работу)
 $Q_H = A_{1-2} = RT_H \ln V_2/V_1$
- Адиабата 2-3: (работа равна убыли энергии)
 $A_{2-3} = (U_2 - U_3) = C_V(T_H - T_x); Q_{2-3} = 0$
- Изотерма 3-4: (работа над газом переходит в теплоту Q_x)
 $Q_x = A_{3-4} = RT_x \ln V_3/V_4$
- Адиабата 4-1: (работа над газом равна увеличению энергии):
 $A_{4-1} = (U_1 - U_4) = C_V(T_H - T_x); Q_{4-1} = 0$
- Полная работа за цикл:
 $A = A_{1-2} + A_{2-3} - A_{3-4} - A_{4-1} = A_{1-2} - A_{3-4} =$
 $R(T_H \ln V_2/V_1 - T_x \ln V_3/V_4)$
- Уравнение адиабаты: $T_H V_1^{\gamma-1} = T_x V_4^{\gamma-1}$
 $T_H V_2^{\gamma-1} = T_x V_3^{\gamma-1} \Leftrightarrow$
 $V_2/V_1 = V_3/V_4 \Leftrightarrow$
- $A = RT_H \ln V_2/V_1 (1 - T_x/T_H) = Q_H (1 - T_x/T_H) \Leftrightarrow$
- $\eta = A/Q_H = (1 - T_x/T_H)$ - КПД машины Карно



Первая теорема Карно

- КПД всех тепловых машин, работающих по циклу Карно между двумя термостатами, равны, независимо от устройства машины и от рода рабочего тела: $\eta_{\text{Карно}} = (T_{\text{н}} - T_{\text{х}})/T_{\text{н}}$
- *Доказательство: «плохую» машину Карно запускаем по холодильному циклу, используя работу «хорошей» машины. Например, «плохая» машина забирает от холодильника 5 Дж, 5 Дж работы берёт от «хорошей» машины и 10 Дж отдаёт нагревателю. «Хорошая» машина от нагревателя берёт 9 Дж и холодильнику возвращает 4 Дж. Результат – невозможный процесс Клаузиуса.*

Вторая теорема Карно

- КПД любой машины, работающей не по циклу Карно, не может превышать КПД машины Карно с теми же тепловыми резервуарами.
- *Доказательство:*
запустим машину Карно по холодильному циклу и при этом она, например, забирает от холодильника 5 Дж и отдаёт нагревателю 10 Дж, используя 5 Дж работы от «хорошей» необратимой машины, которая забирает от нагревателя 9 Дж, а холодильнику возвращает 4 Дж. Результат – невозможный процесс Клаузиуса.