

# Концепции и модели физики

Кузьмичев Сергей Дмитриевич



# Содержание лекции №3

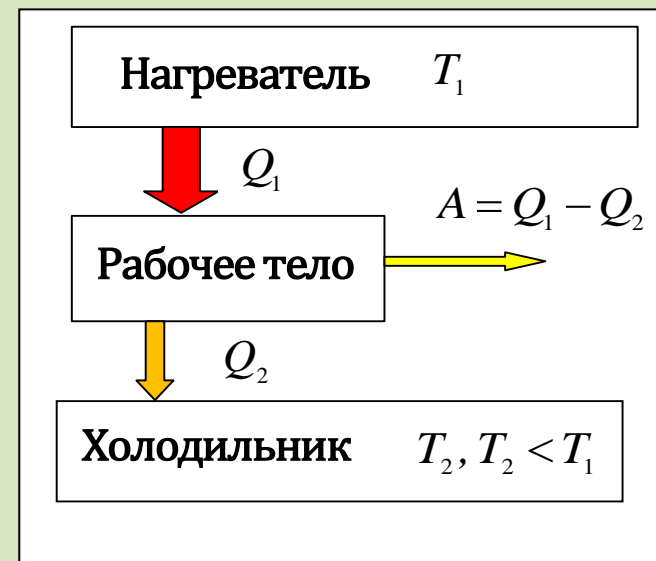
1. Тепловая машина.
2. Второе начало термодинамики.
3. КПД тепловой машины.
4. Цикл Карно. КПД машины Карно.
5. Теоремы Карно. Необратимость тепловых процессов.
6. Холодильная машина и тепловой насос.
7. Энтропия. Термодинамическое определение энтропии.
8. Закон возрастания энтропии.
9. Энтропия идеального газа. Возрастание энтропии при расширении идеального газа в вакуум и при смешении газов.
10. Статистическое определения энтропии.

**Круговым процессом** (или **циклом**) называется термодинамический процесс с телом, в результате совершения которого тело, возвращается в исходное состояние.

**Прямым циклом** называется круговой процесс, в котором тело совершает положительную работу за цикл.

**Тепловой машиной** называется устройство, которое преобразует теплоту в работу или обратно и действует строго периодически, т.е. после завершения цикла возвращается в исходное состояние.

Основные элементы тепловой машины: **рабочее тело, нагреватель, холодильник.**



Транспортные средства с тепловыми двигателями



Пароход (1807)



Паровоз (1825)



Автомобиль (1885)



Подводная лодка (1897)



Самолёт (1903)



Вертолёт (1907)



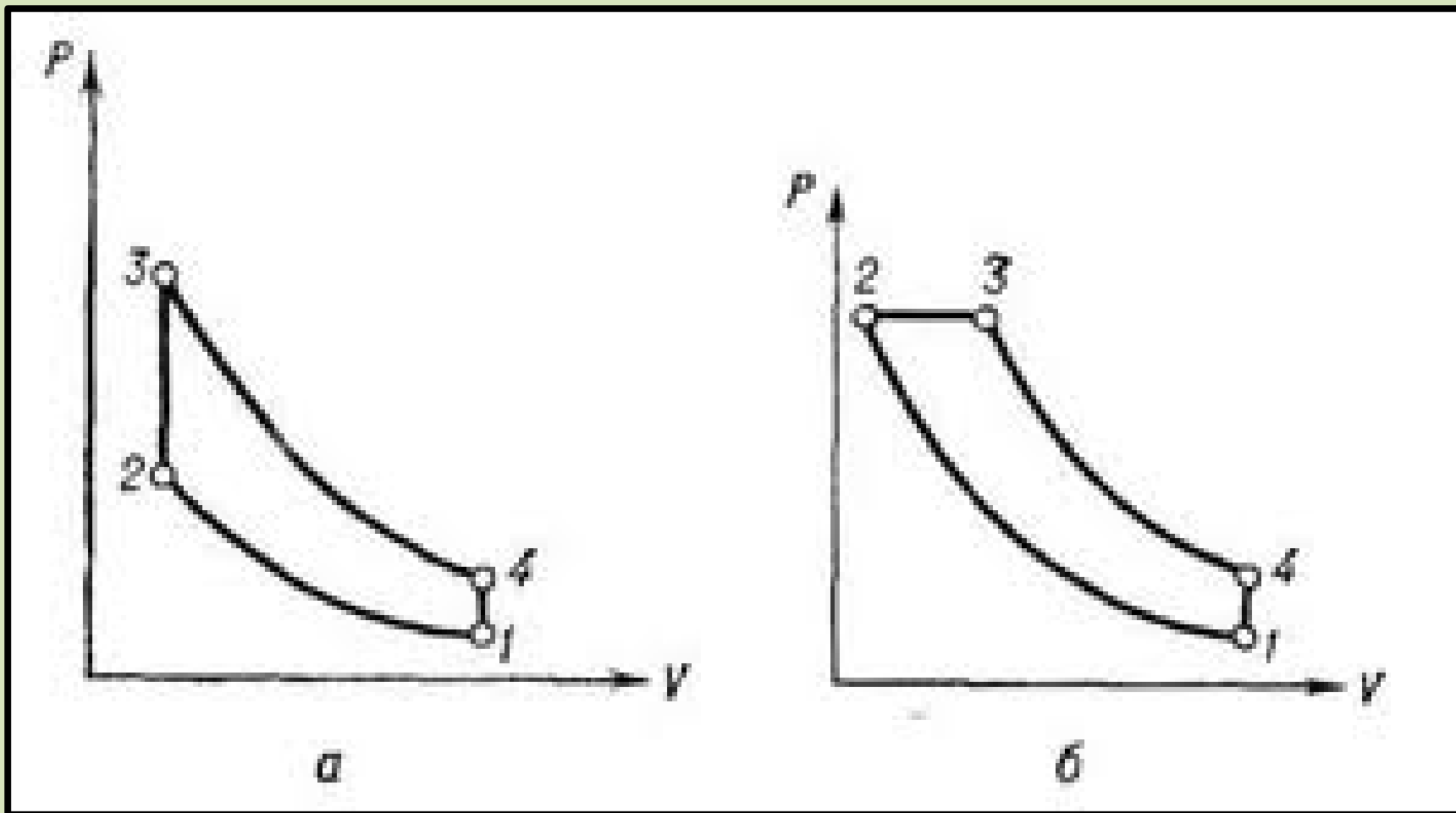
Тепловоз (1950)



Атомная подводная лодка (1954)

Ракета (1961)





Циклы Отто (а) и Дизеля (б)

# Второе начало термодинамики

❖ Тепло не может **самопроизвольно**, т.е. так, чтобы не происходит никаких других изменений в состоянии любых тел, переходить от менее нагретого тела к более нагретому.

/ Клаузиус /

❖ Невозможен круговой процесс, **единственным результатом** которого было бы производство работы за счет охлаждения теплового резервуара.

/ Томсон (лорд Кельвин) /

❖ Невозможно построить периодически действующую машину, **единственным результатом** функционирования которой было бы поднятие груза за счет охлаждения теплового резервуара.

/ Планк /

❖ Невозможен вечный двигатель второго рода, т.е. двигатель использующий **только один тепловой резервуар**.

/Оствальд/

# Эквивалентность формулировок

## Клаузиуса и Томсона

Пусть формулировка Томсона неверна, т.е. возможен процесс, в котором работа совершается за счет теплоты, взятой от единственного источника энергии с температурой  $T_1$ . Допустим, что эта работа идет на поднятие груза.

Пусть процесс возвращения груза в исходное состояние происходит в среде с температурой  $T_2 > T_1$  и при этом возникают силы трения. Тогда, выделяющееся тепло поступает в среду, температура которой выше температуры источника энергии, в то время как все тела вернулись в исходное состояние.

Это противоречит второму началу термодинамики в формулировке Клаузиуса.

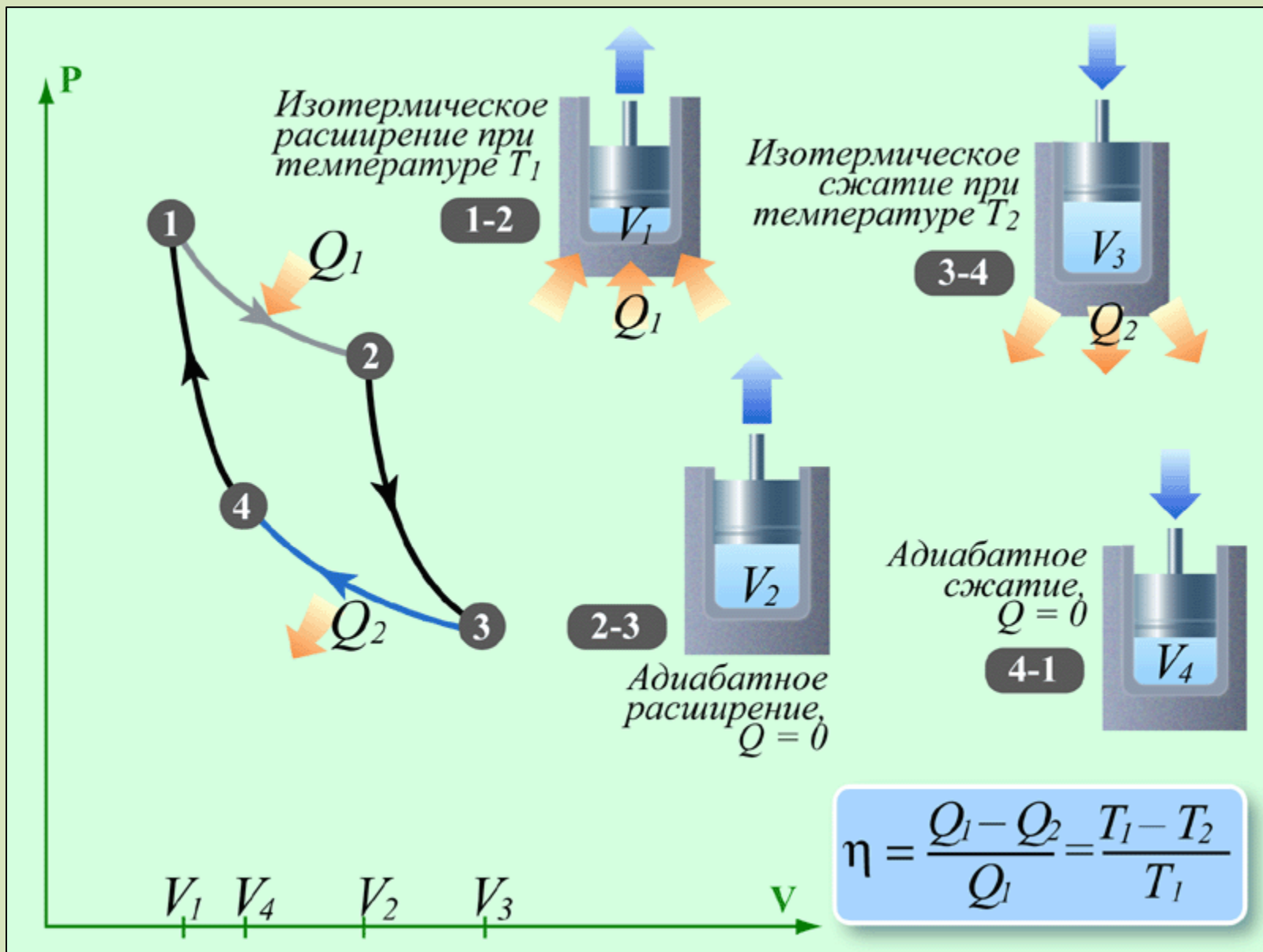
# Коэффициент полезного действия тепловой машины

$$\eta = \frac{A_{\text{цикл}}}{\sum_i Q_{\text{пол},i}} = \frac{\sum_i Q_{\text{пол},i} - \sum_i Q_{\text{отд},i}}{\sum_i Q_{\text{пол},i}},$$

$$Q_{\text{пол},i} > 0, \quad Q_{\text{отд},i} > 0.$$



# Цикл Карно





Сади Карно  
(1796-1832)

*Réflexions sur la puissance motrice du feu  
et sur les machines propres à développer cette  
puissance (1824)*

**Цикл Карно для тепловой машины,  
где рабочее вещество – идеальный газ.**

Изотерма 1-2 (расширение):

$$Q_{1-2} = \nu RT_1 \cdot \ln V_2 / V_1 = Q_1 > 0$$

Адиабата 2-3 (расширение):

$$Q_{2-3} = \nu C_V T_3 - T_2 + A_{2-3} = 0,$$
$$T_2 V_2^{\gamma-1} = T_3 V_3^{\gamma-1}.$$

Изотерма 3-4 (сжатие):

$$Q_{3-4} = \nu RT_2 \cdot \ln V_4 / V_3 < 0, \quad Q_{3-4} = -Q_1, \quad Q_1 > 0$$

Адиабата 4-1 (сжатие):

$$Q_{4-1} = \nu C_V T_1 - T_4 + A_{4-1} = 0,$$
$$T_4 V_4^{\gamma-1} = T_1 V_1^{\gamma-1}.$$

$$T_1 = T_2 = T_H, \quad T_3 = T_4 = T_X,$$

$$T_H V_2^{\gamma-1} = T_X V_3^{\gamma-1},$$

$$T_X V_4^{\gamma-1} = T_H V_1^{\gamma-1}$$

$$\frac{V_2}{V_3} = \frac{V_1}{V_4} \Rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$$

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

КПД машины Карно

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_X}{T_H}$$

## Первая теорема Карно.

КПД всех машин, работающих по циклу Карно между двумя данными термостатами, равны, независимо от конкретного устройства машины и от рода рабочего тела.

Необратимые процессы.

Причины необратимости реальных процессов (трение, теплопередача, диффузия).

## Вторая теорема Карно.

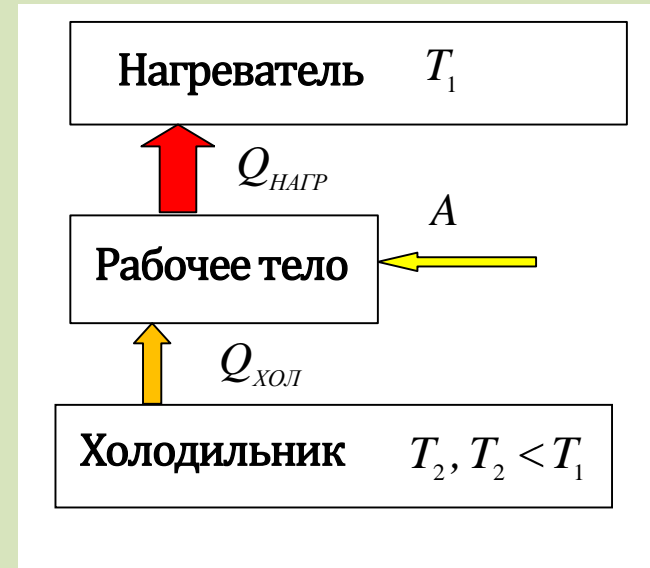
КПД любой машины, работающей не по циклу Карно не может превышать КПД машины Карно, работающей между теми же тепловыми резервуарами.

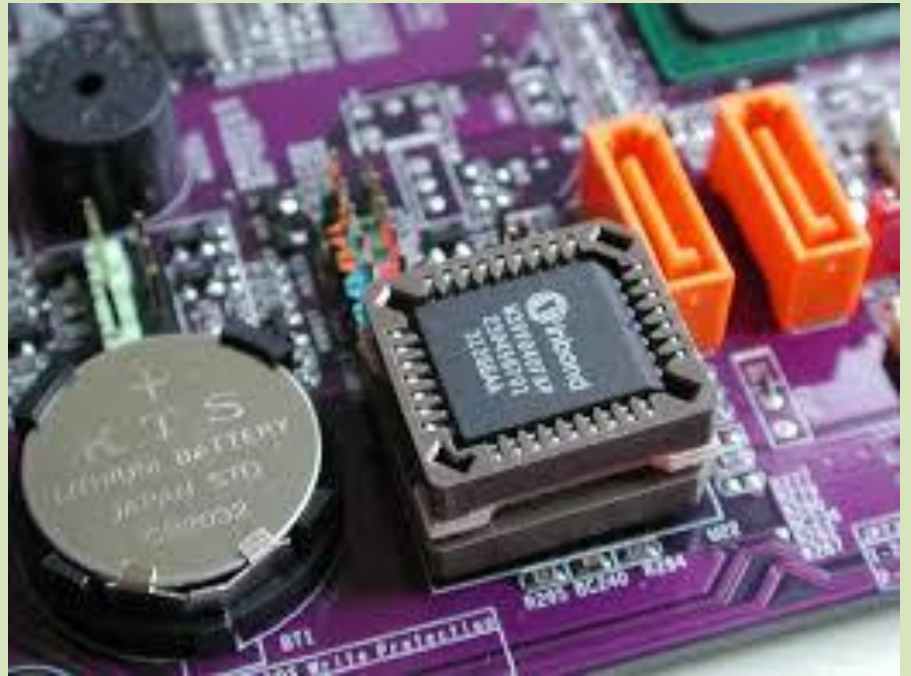
## Эффективность холодильной машины (холодильный коэффициент)

$$\eta_{X.M.} = \frac{Q_X}{A} = \frac{Q_X}{Q_H - Q_X}$$

## Эффективность теплового насоса

$$\eta_{T.H.} = \frac{Q_H}{A} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_X}$$







**Роберт Вебер в 40-х годах XX века предложил идею «выкачивать» тепло из земли, где температура не слишком изменялась в течение года. Он поместил в грунт медные трубы, по которым циркулировал фреон, который «собирал» тепло земли. Газ конденсировался, отдавал своё тепло в доме, и снова проходил через змеевик, чтобы подобрать следующую порцию тепла. Воздух приводился в движение с помощью вентилятора и распространялся по дому.**



# Энтропия

Приведенное количество теплоты

$$\eta \leq \eta_{\text{Карно}},$$

$$\frac{Q_1^+ - |Q_2^+|}{Q_1^+} = \frac{Q_1^+ + Q_2^+}{Q_1^+} \leq \frac{Q_{1,K}^+ - |Q_{2,K}^+|}{Q_{1,K}^+} = \frac{Q_{1,K}^+ + Q_{2,K}^+}{Q_{1,K}^+}$$

$$1 + \frac{Q_2^+}{Q_1^+} \leq \frac{Q_{1,K}^+ + Q_{2,K}^+}{Q_{1,K}^+} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

$$\frac{Q_1^+}{T_1} + \frac{Q_2^+}{T_2} \leq 0$$

$$\frac{Q_i^+}{T_i}$$

- приведенное количество теплоты

Для произвольного цикла

$$\sum_{i=1}^n \frac{Q_i^+}{T_i} \leq 0, \quad \oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

Для обратимого цикла

$$\sum_{i=1}^n \frac{Q_i^+}{T_i} = 0, \quad \oint \frac{\delta Q}{T} = 0$$

Для двух обратимых процессов 1-a-2 и 1-b-2

$$\int_{1a2} \frac{\delta Q}{T} = \int_{1b2} \frac{\delta Q}{T}$$

$$S_2 - S_1 = \int_{1a2} \frac{\delta Q}{T} = \int_{1b2} \frac{\delta Q}{T} = \int_1^2 dS$$

Термодинамическое определение энтропии

$$dS = \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{обр}$$

Для произвольного процесса 1-2

$$S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

Для замкнутой (изолированной) системы

$$\delta Q = 0, \quad dS \geq 0,$$
$$S_2 - S_1 \geq 0$$

В замкнутой, полностью изолированной системе возможны только процессы, при которых **энтропия не убывает**.

Энтропия замкнутой системы, находящейся в состоянии **термодинамического равновесия**, энтропия **максимальна**.

## Энтропия идеального газа

$$dS = \nu C_V \frac{dT}{T} + \nu R \frac{dV}{V}$$

$$S_2 - S_1 = \nu C_V \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + \nu R \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

Адиабатическое расширение идеального газа в вакуум

$$S_2 - S_1 = \nu R \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) > 0$$

Возрастание энтропии при смешении газов.  
Парадокс Гиббса.

а) Разные газы

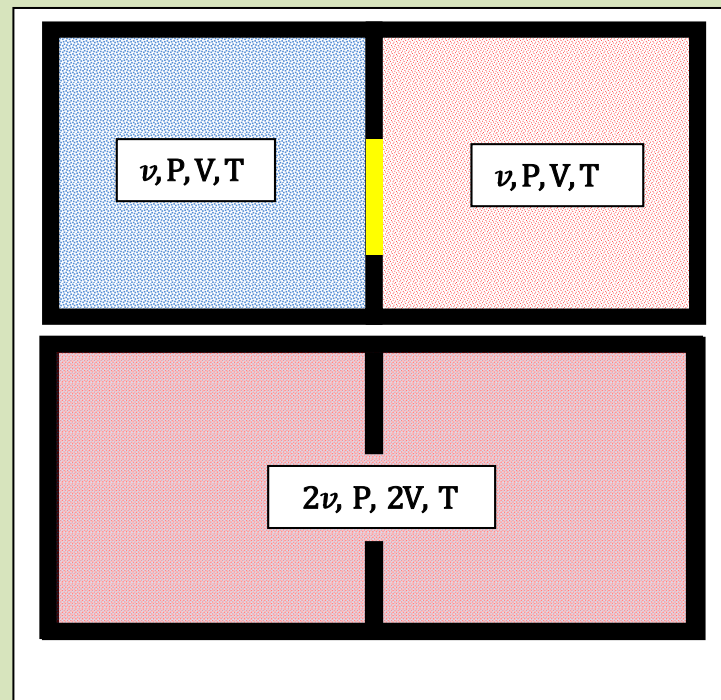
$$\Delta S_{\text{син}} = \nu R \ln 2, \quad \Delta S_{\text{зел}} = \nu R \ln 2,$$
$$\Delta S_{\Sigma} = \Delta S_{\text{син}} + \Delta S_{\text{зел}} = 2\nu R \ln 2 > 0$$



Процесс необратимый

б) Одинаковые газы

$$\Delta S_{\Sigma} = 0$$



# Цикл Карно и энтропия

Теплота, полученная от нагревателя

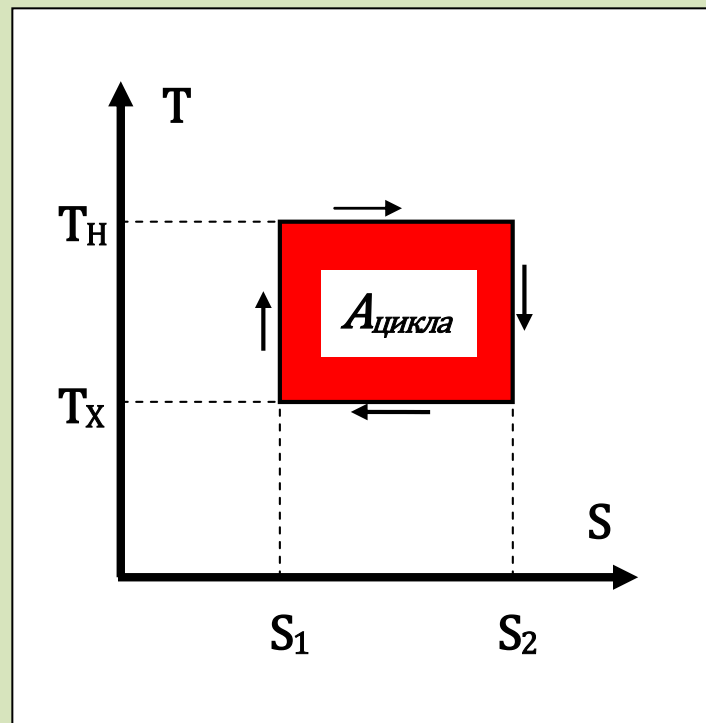
$$Q_H = T_H \cdot S_2 - S_1$$

Теплота, отданная холодильнику

$$Q_X = T_X \cdot S_2 - S_1$$

Работа за цикл

$$A_{\text{цикла}} = Q_H - Q_X = T_H - T_X \cdot S_2 - S_1$$



# Энтропия и вероятность.

## Статистическое определение энтропии.

Гипотеза Больцмана

$$S = k_B \cdot \ln P$$

$$S = k_B \cdot \ln G$$

$G$  - статистический вес или термодинамическая вероятность (число способов, которым можно реализовать данное макроскопическое состояние).

Возрастание энтропии соответствует переходу в наиболее вероятное состояние.

Максимальная вероятность — у состояния термодинамического равновесия.



$$S = k \cdot \log W$$



LVDWIG  
BOLTZMANN

1844 - 1906

DR PHIL. PAULA  
BOLTZMANN

GEB. CHIARI