

Лекция 13 – 2020 г.

Тепловые и холодильные машины.

Второе начало термодинамики.

Цикл Карно. Теорема Карно.

Термодинамическая шкала температур.

Неравенство Клаузиуса.

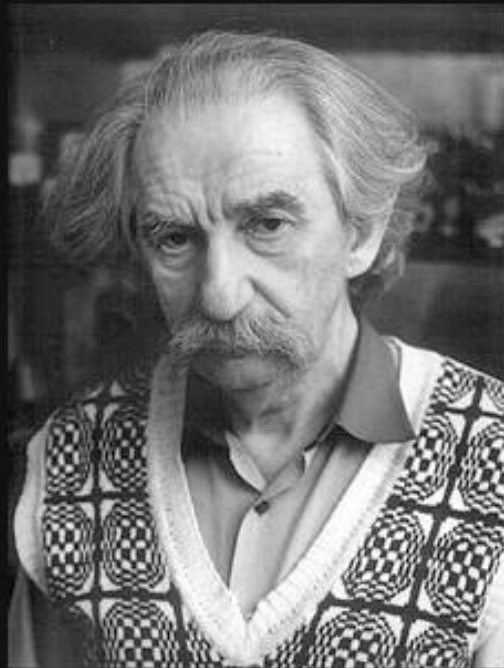
Термодинамическая энтропия.

Закон возрастания энтропии.

Третье начало термодинамики.

Молодость – вот время для
усвоения мудрости, старость –
время для ее применения

Жан-Жак Руссо



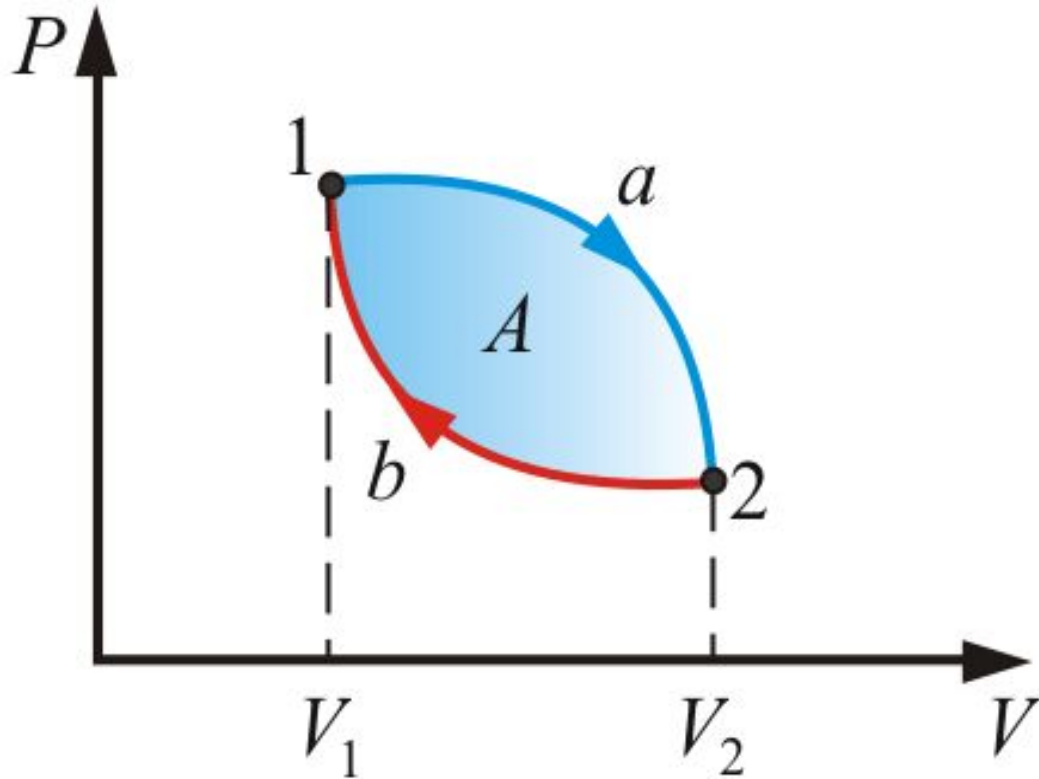
Одна из основных функций культуры —
противостоять наступлению энтропии.

(Юрий Михайлович Лотман)

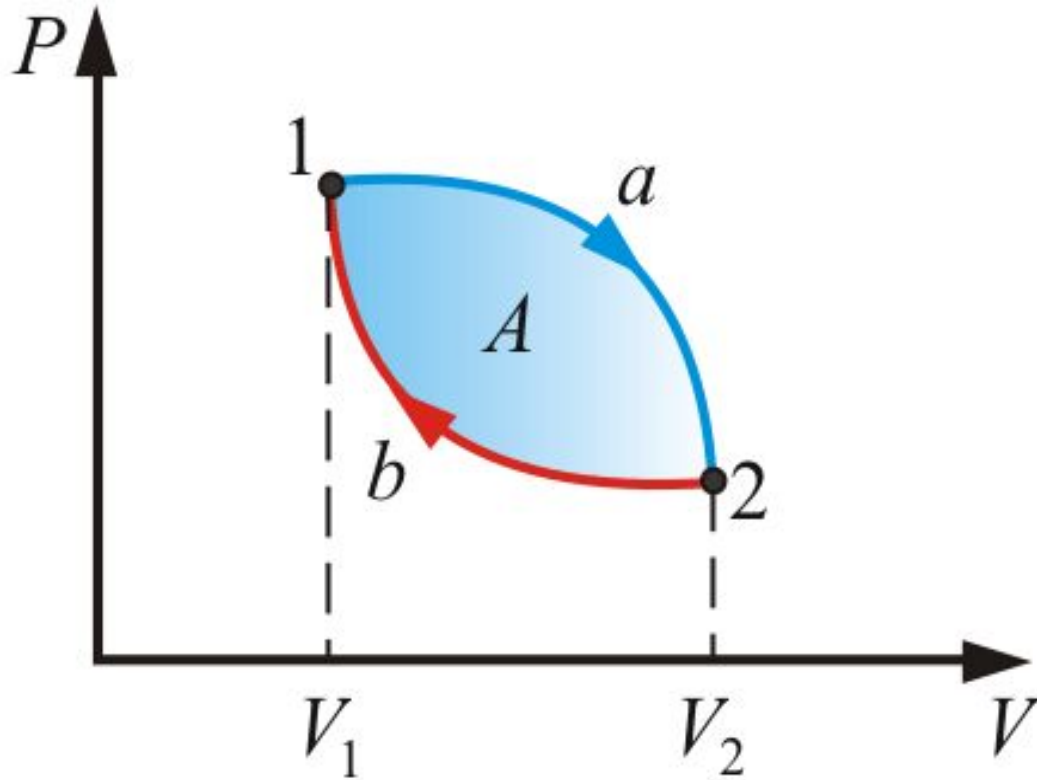
tsitaty.com

Круговые обратимые и необратимые процессы

Круговым процессом или циклом называется такой процесс, в результате которого термодинамическое тело возвращается в исходное состояние.



В диаграммах состояния P , V и других круговые процессы изображаются в виде замкнутых кривых. Это связано с тем, что в любой диаграмме **два тождественных состояния** (начало и конец кругового процесса) изображаются одной и той же точкой на плоскости.



Цикл, совершаемый идеальным газом, можно разбить на процессы:

расширения (1 – 2)
сжатия (2 – 1) газа

Работа расширения положительна ($dV > 0$)

Работа сжатия отрицательна ($dV < 0$).

Работа, совершаемая за цикл, определяется площадью, охватываемой кривой

Если за цикл совершается положительная работа (цикл протекает по часовой стрелке), то он называется

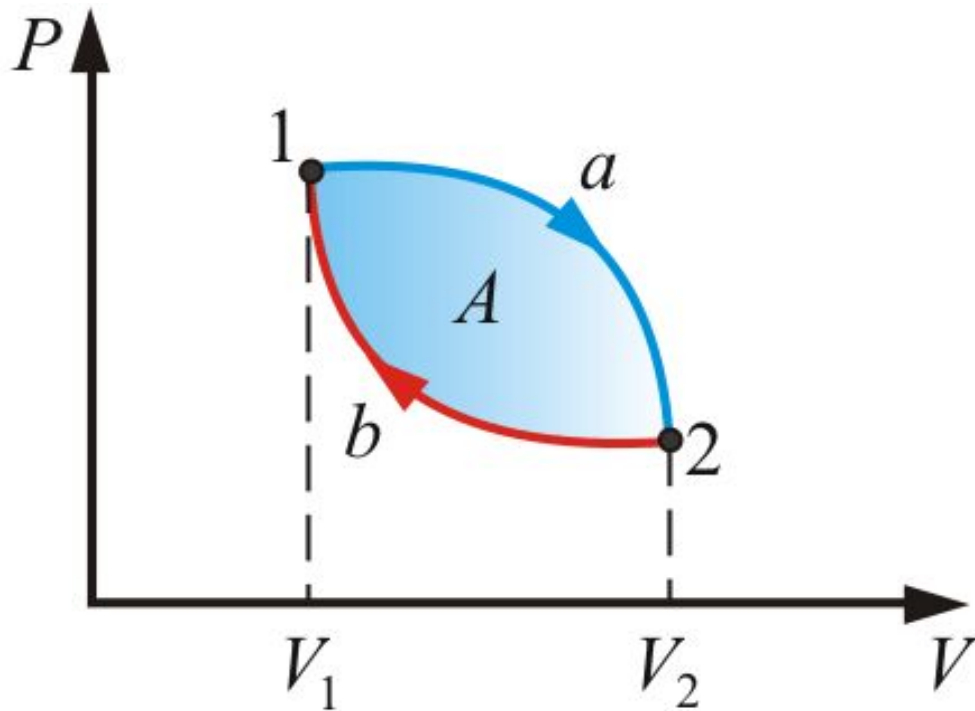
прямым

$$A = \oint P dV > 0$$

Если за цикл совершается отрицательная работа

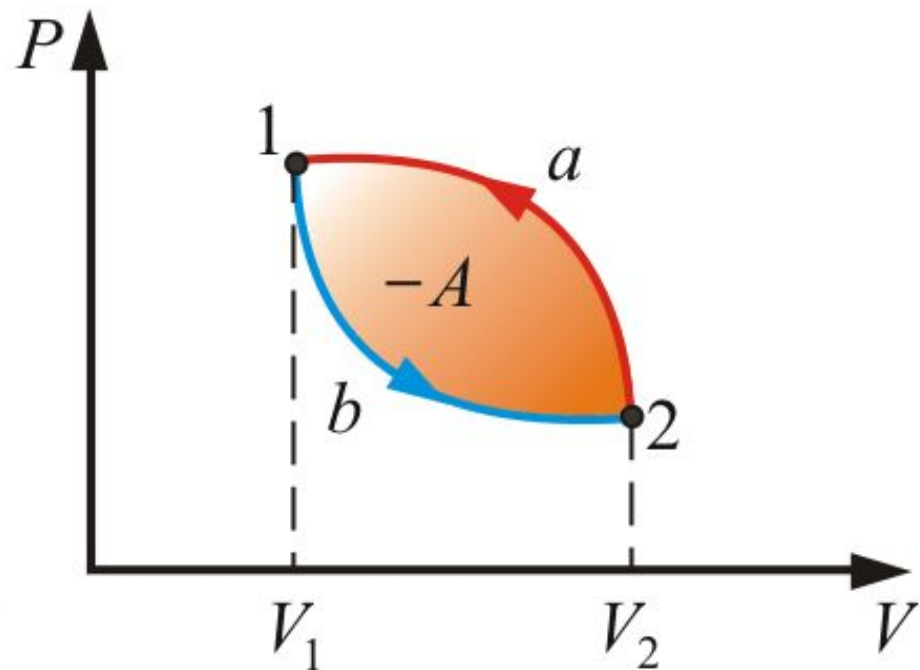
$$A = \oint P dV < 0$$

(этот цикл протекает против часовой стрелки), то он называется **обратным**.



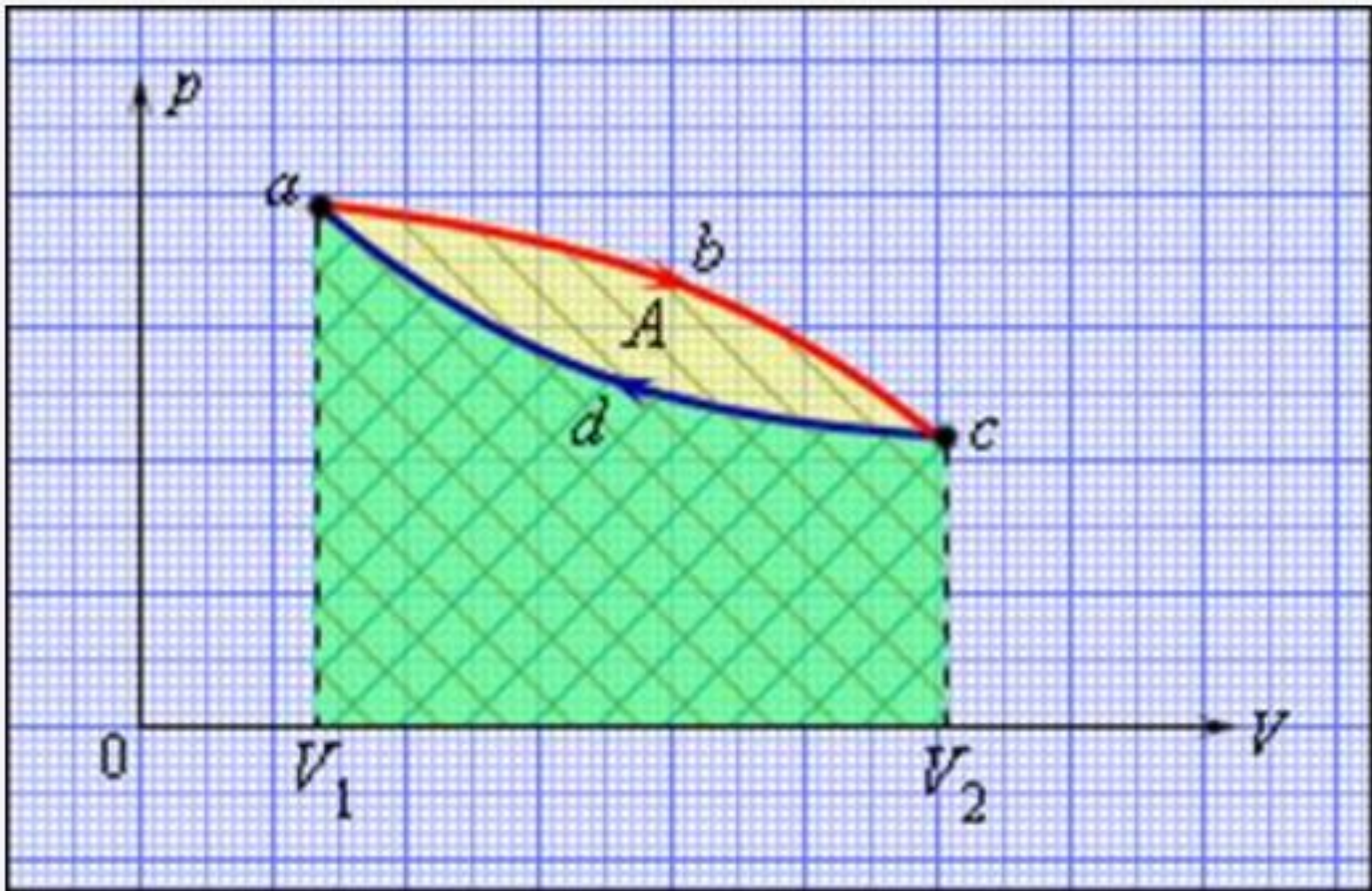
Прямой цикл

$$A = \oint P dV > 0$$



Обратный цикл

$$A = \oint P dV < 0$$



Круговой процесс на диаграмме (p, V). abc - кривая расширения, cda - кривая сжатия. Работа A в круговом процессе равна площади фигуры $abcd$

Круговые процессы лежат в основе всех тепловых машин: двигателей внутреннего сгорания, паровых и газовых турбин, паровых и холодильных машин и т. д.

В результате кругового процесса система возвращается в исходное состояние и, следовательно, полное изменение внутренней энергии газа равно нулю: $dU = 0$

Тогда первое начало термодинамики для кругового процесса имеет вид

$$Q = \Delta U + A = A$$

Термический коэффициент полезного действия для кругового процесса

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}.$$

Все термодинамические процессы, в том числе и круговые, делят на две группы: обратимые и необратимые.

Процесс называют обратимым, если он протекает таким образом, что после окончания процесса он может быть проведен в обратном направлении через все те же промежуточные состояния, что и прямой процесс.

После проведения **кругового обратимого** процесса никаких изменений в среде, окружающей систему, не произойдет.

Свойством обратимости обладают только равновесные процессы.

Каждое промежуточное состояние является состоянием термодинамического равновесия, нечувствительного к тому, идет ли процесс в прямом или обратном направлении.

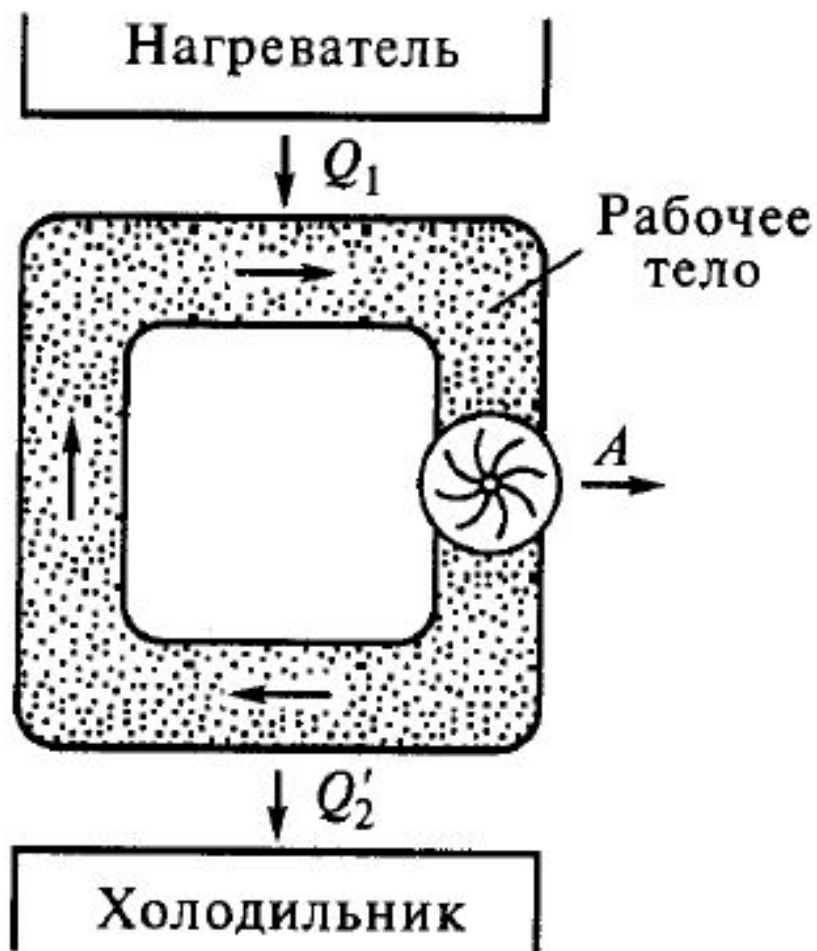
Например, **обратимым можно считать процесс адиабатического расширения или сжатия газа.**

Обратимые процессы – это идеализация реальных процессов. Но их рассмотрение важно по двум причинам:

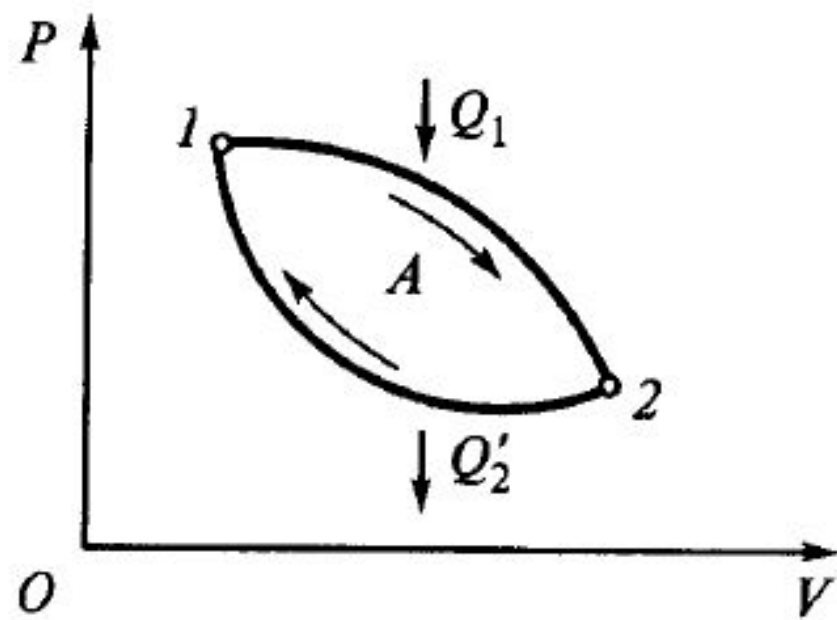
- многие процессы в природе и технике практически обратимы;
- обратимые процессы являются наиболее экономичными и приводят к максимальному значению коэффициента полезного действия тепловых двигателей.

Тепловые машины

Тепловой машиной называется периодический действующий двигатель, совершающий работу за счет получаемого **извне** тепла.



a



b

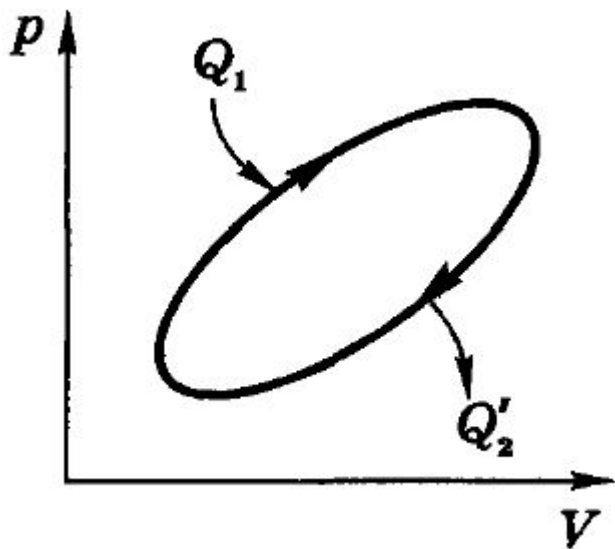
Схема тепловой машины (а) и ее термодинамический цикл (б)

Второе начало термодинамики

Существует несколько формулировок второго начала.

1. Клаузиус (1850): *невозможен самопроизвольный переход тепла от менее к более нагретому телу, или невозможны процессы, единственным конечным результатом которых был бы переход тепла от менее к более нагретому телу.*

2. Кельвин (1851): *невозможны процессы, единственным конечным результатом которых было бы превращение тепла целиком в работу.*



Из опыта:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q'_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q'_2}{Q_1}.$$

можно перефразировать формулировку Кельвина так: *перпетуум-мобиле 2-го рода невозможен, или невозможно создать тепловой двигатель с КПД $\eta = 1$. Напомним, КПД теплового двигателя $\eta = A/Q$, где Q — сообщенное двигателю тепло, A — произведенная им работа.*



Карно Никола Леонард Сади

(1796 – 1832) – французский физик и инженер, один из создателей термодинамики. Впервые показал, что работу можно получить в

случае, когда тепло переходит от нагретого

тела к более холодному (второе начало

термодинамики). Ввел понятие кругового и

обратимого процессов, идеального цикла тепловых

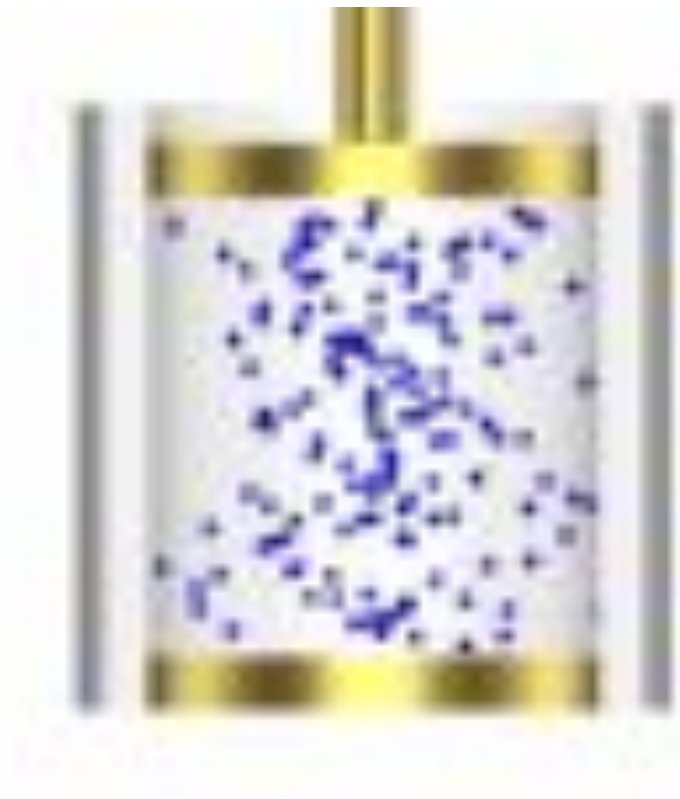
машин, заложил тем самым основы их теории.

Пришел к понятию механического эквивалента

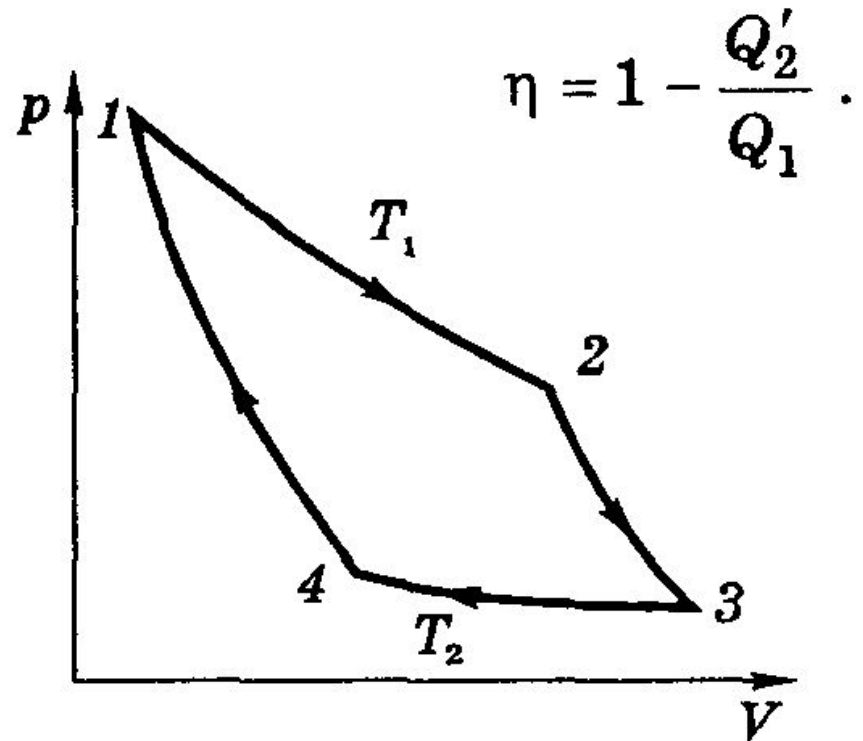
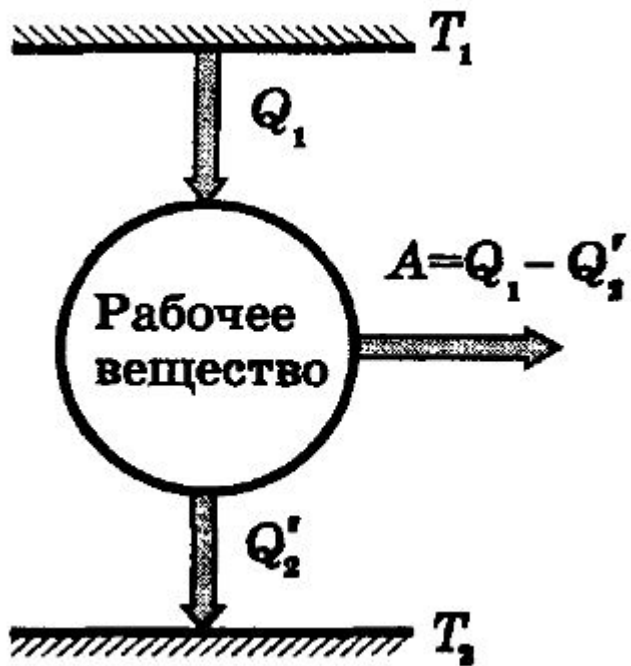
теплоты. В 1824 г. опубликовал сочинение

«**Размышления о движущей силе огня и о машинах способных развить эту силу**».

Цикл Карно (обратимый)



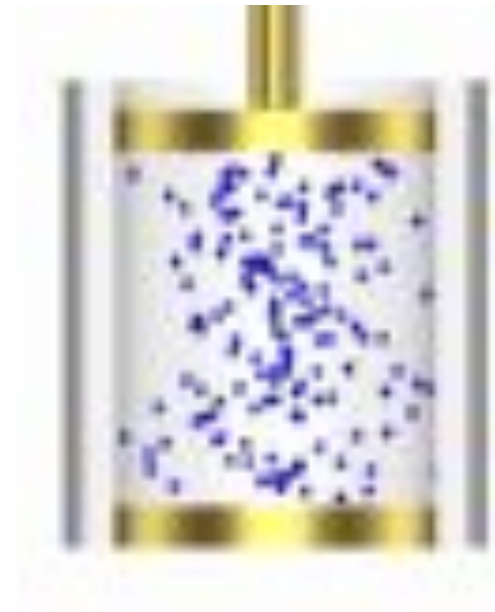
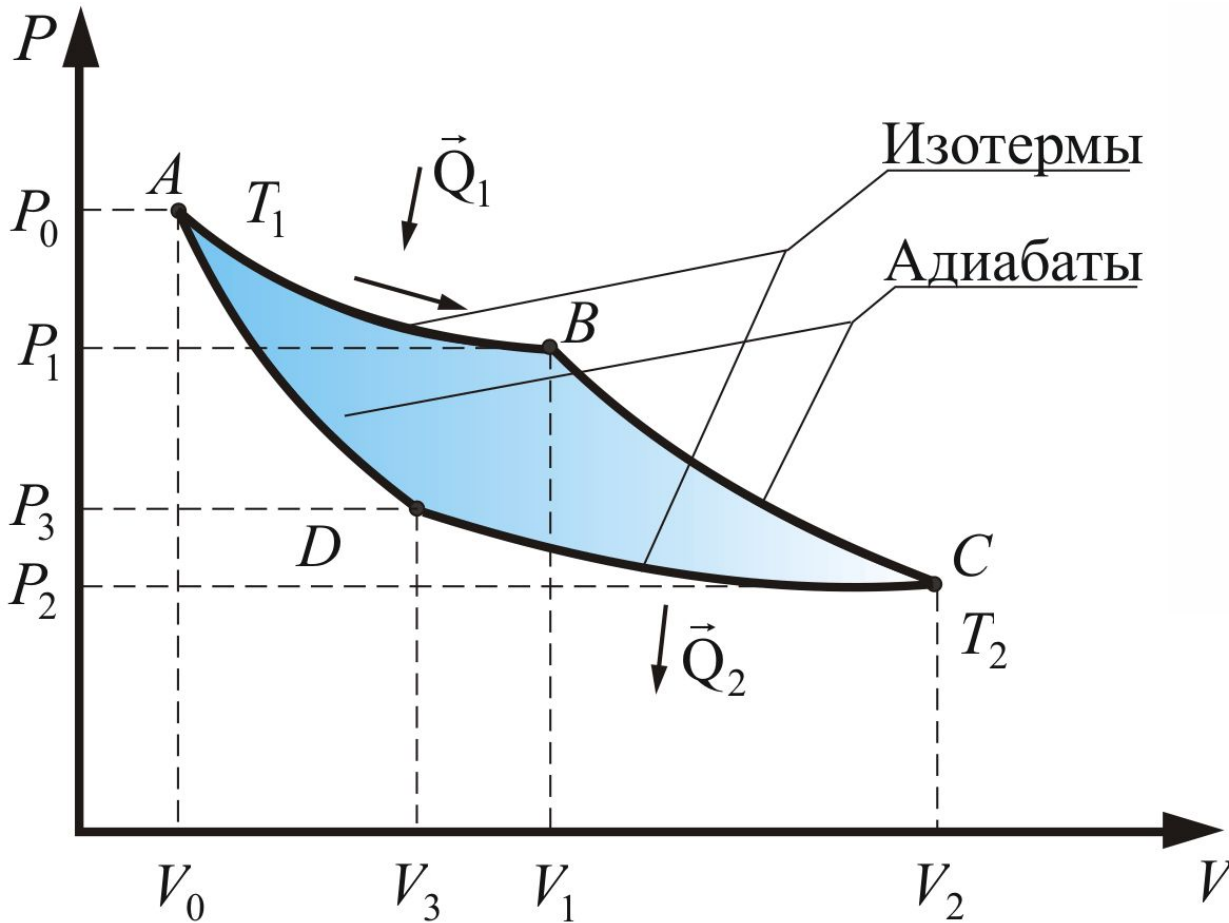
Цикл Карно



Цикл Карно

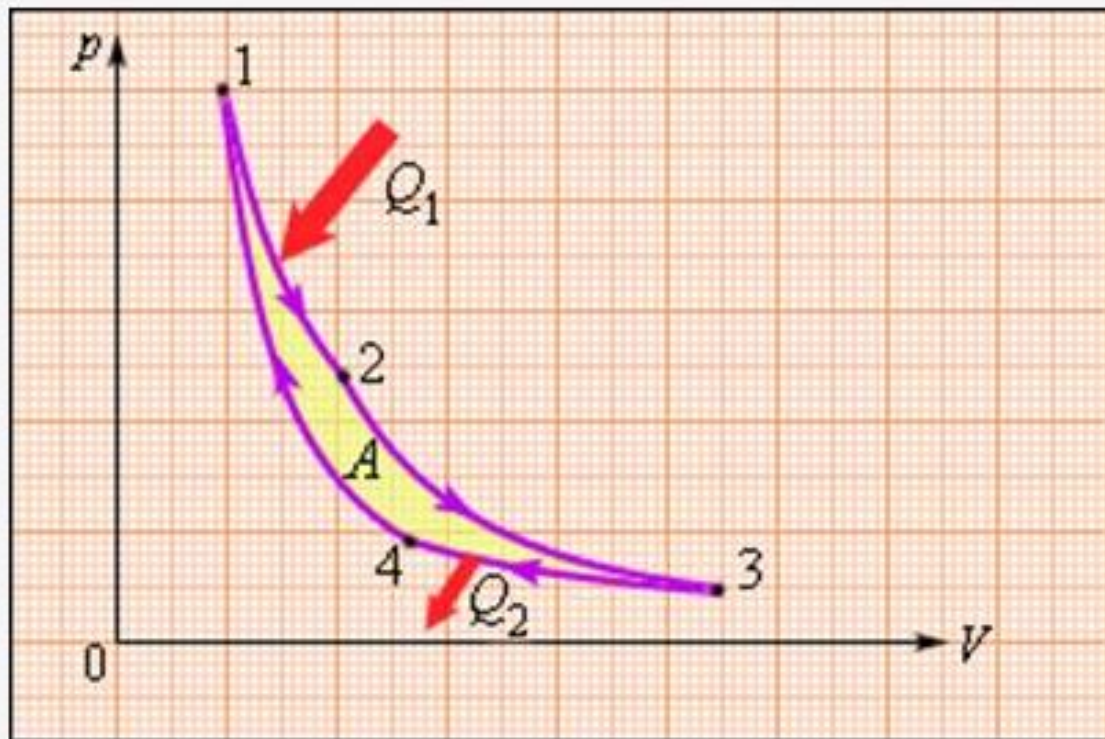
$$\eta = 1 - \frac{Q_2'}{Q_1}$$

Работа и КПД цикла Карно

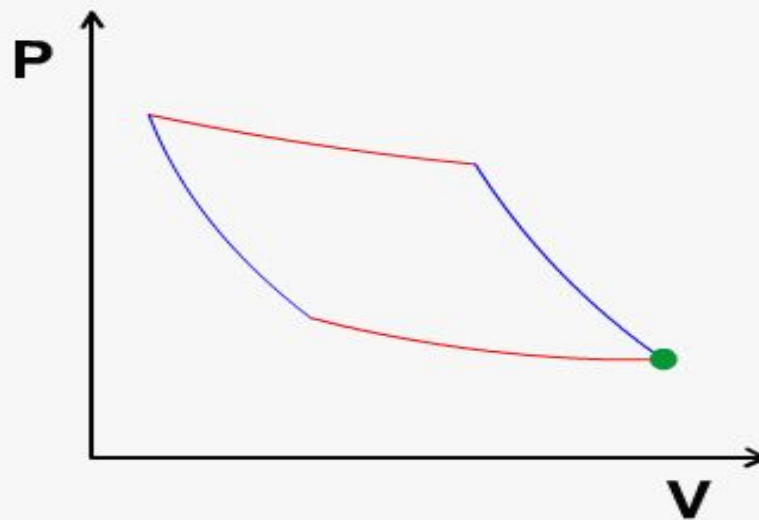
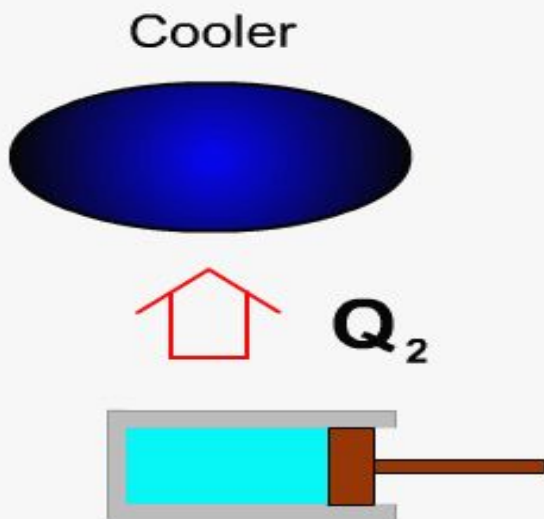




В 1824 году французский инженер С. Карно рассмотрел круговой процесс, состоящий из двух изотерм и двух адиабат, который сыграл важную роль в развитии учения о тепловых процессах. Он называется **циклом Карно**



Чтобы вернуть поршень в исходное состояние, необходимо сжать рабочее тело, для этого следует затратить работу A .

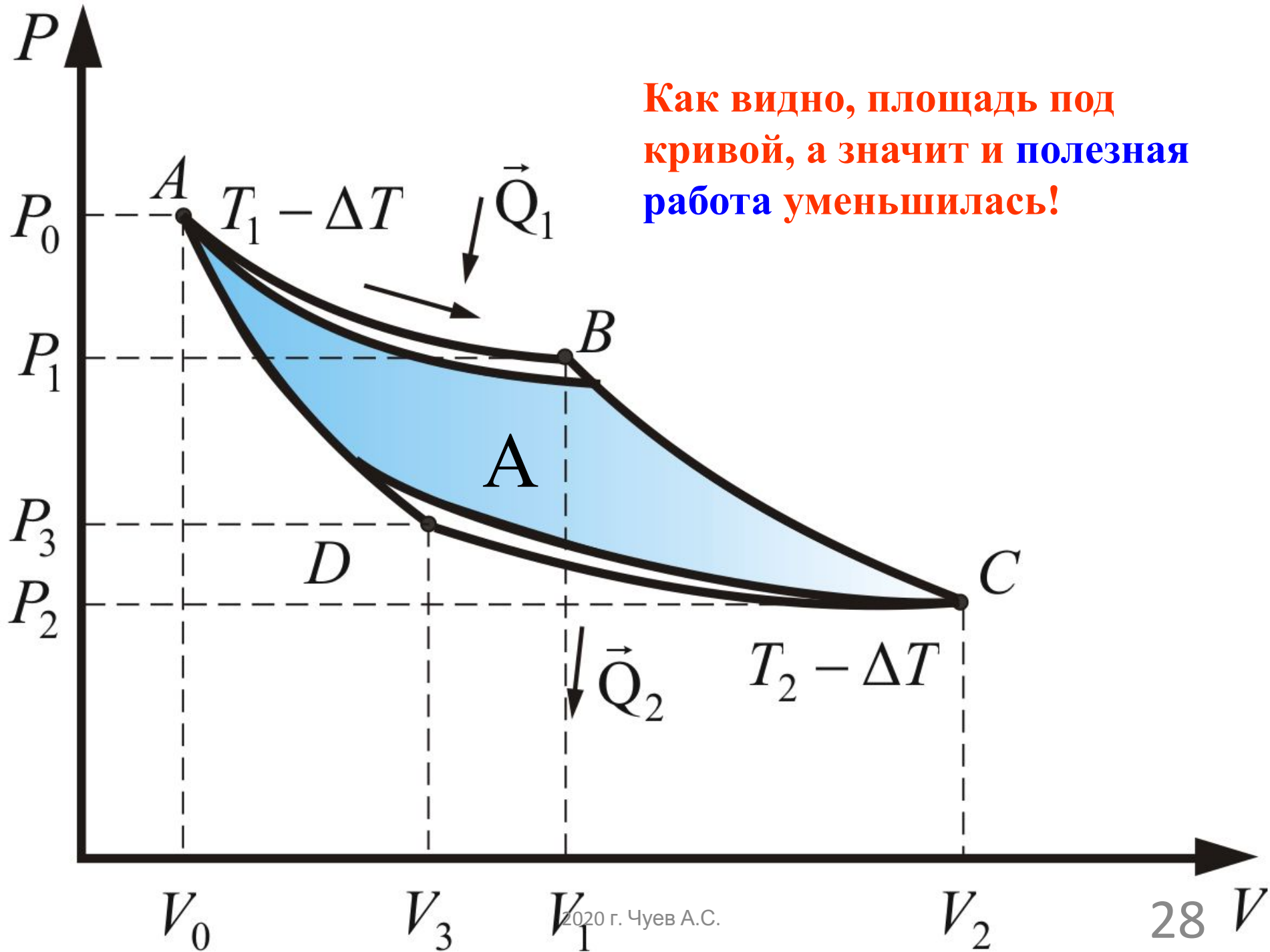


$$A = Q_1 - Q_2$$

$$\eta = \frac{A}{Q_1} \leq 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

В случае тепловых машин,
***нагреватель и холодильник – не
идеальны, они не обладают
бесконечной теплоёмкостью*** и в
процессе работы получают или
отдают добавочную температуру ΔT .

Как видно, площадь под кривой, а значит и полезная работа уменьшилась!



КПД для обратимого цикла Карно:

$$\eta_{\text{обр}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Для необратимого цикла

$$\eta_{\text{необр}} = 1 - \frac{T_2 - \Delta T}{T_1 - \Delta T} < 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Всегда $\eta_{\text{обр}} > \eta_{\text{необр}}$

– ЭТОТ ВЫВОД СПРАВЕДЛИВ НЕЗАВИСИМО ОТ ПРИЧИН НЕОБРАТИМОСТИ ЦИКЛА КАРНО.

Терема Карно

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} .$$

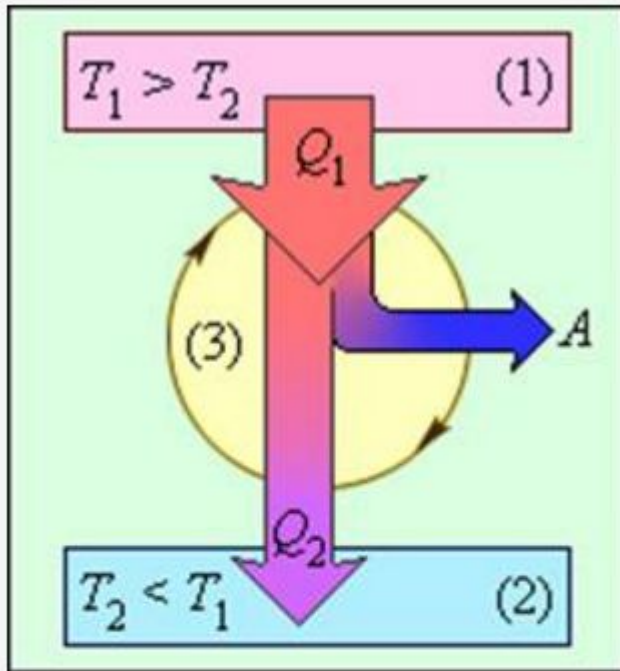
При выводе этой формулы не делалось никаких предположений о свойствах рабочего вещества и устройстве теплового двигателя. Отсюда следует знаменитая *теорема Карно*:

КПД обратимых двигателей, работающих по циклу Карно, зависит только от температур T_1 и T_2 — нагревателя и холодильника, но не зависит ни от устройства двигателя, ни от рода рабочего вещества.

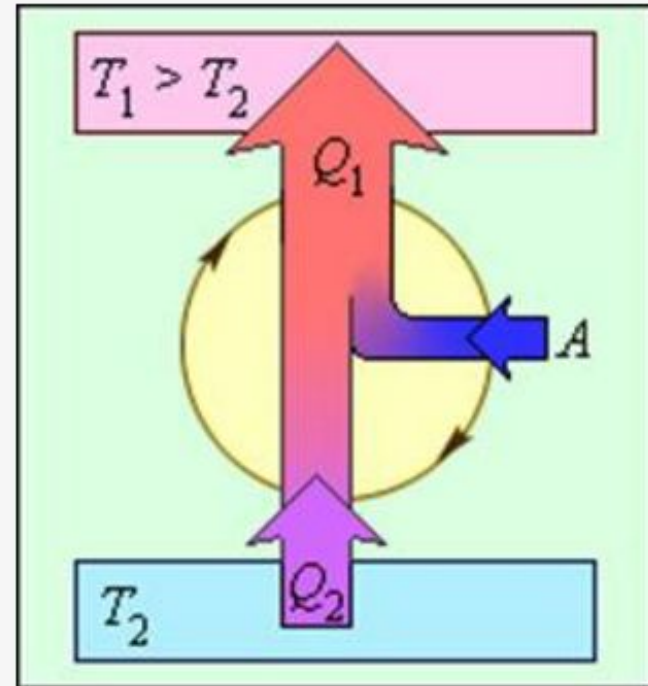
Холодильная машина

Эта машина, работающая по обратному циклу Карно.

Если проводить цикл в обратном направлении, тепло будет забираться у холодильника и передаваться нагревателю (за счет работы внешних сил).



Энергетическая схема тепловой машины: 1 - нагреватель; 2 - холодильник; 3 - рабочее тело, совершающее круговой процесс. $Q_1 > 0$, $A > 0$, $Q_2 < 0$; $T_1 > T_2$



Энергетическая схема холодильной машины. $Q_1 < 0$, $A < 0$, $Q_2 > 0$, $T_1 > T_2$

Устройство, работающее по холодильному циклу, может иметь двойное предназначение. Если полезным эффектом является отбор некоторого количества тепла $|Q_2|$ от охлаждаемых тел (например, от продуктов в камере холодильника), то такое устройство является обычным холодильником. Эффективность работы холодильника можно охарактеризовать отношением

$$\beta_x = \frac{|Q_2|}{|A|},$$

т. е. эффективность работы холодильника - это количество тепла, отбираемого от охлаждаемых тел на 1 джоуль затраченной работы. При таком определении β_x может быть и больше, и меньше единицы. Для обращенного цикла Карно

$$\beta_x = \frac{T_2}{T_1 - T_2}.$$

Если полезным эффектом является передача некоторого количества тепла $|Q_1|$ нагреваемым телам (например, воздуху в помещении), то такое устройство называется *тепловым насосом*. Эффективность β_T теплового насоса может быть определена как отношение

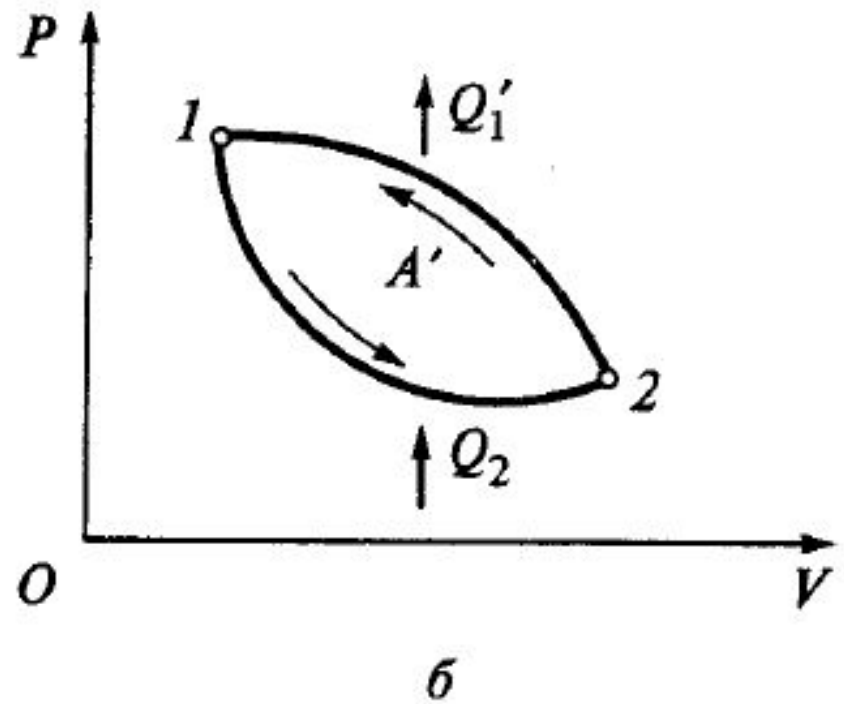
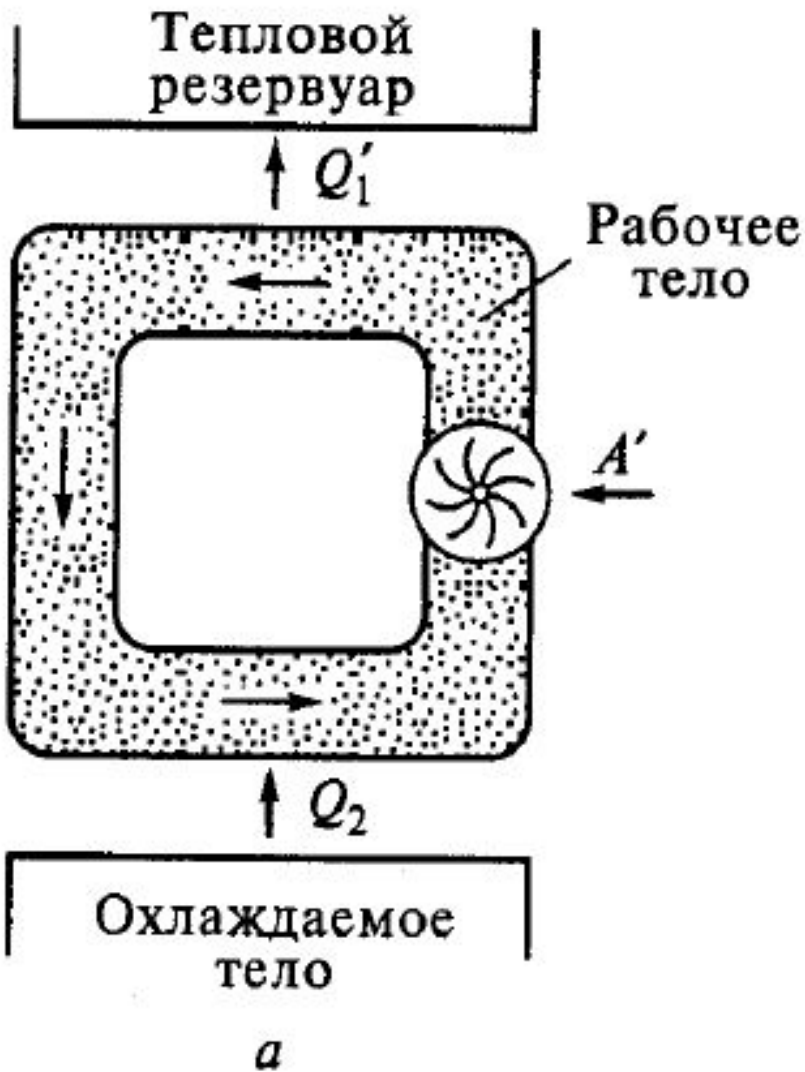
$$\beta_T = \frac{|Q_1|}{|A|},$$

т. е. количеством теплоты, передаваемым более теплым телам на 1 джоуль затраченной работы. Из первого закона термодинамики следует:

$$|Q_1| > |A|,$$

следовательно, β_T всегда больше единицы. Для обращенного цикла Карно

$$\beta_T = \frac{1}{\eta} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}.$$



$$\eta_{\text{XM}} = \frac{Q_2}{A'} = \frac{Q_2}{Q'_1 - Q_2}$$

Схема холодильной машины (а) и ее термодинамический цикл (б)

Тепловой насос

$$\eta_{TH} = \frac{Q'_1}{A'} = \frac{Q'_1}{Q'_1 - Q_2} = \frac{-Q_1}{-A} = \frac{1}{\eta}$$

Термодинамическая энтропия

Открытие Клаузиусом энтропии — одно из самых удивительных, сделанных «на кончике пера», т.е. чисто теоретически.

$$dS = \frac{d'Q}{T} .$$

энтропия такая же функция состояния как температура, внутренняя энергия или давление. Полученное системой тепло Q зависит от процесса перехода из начального состояния в конечное, приращение же энтропии ΔS совершенно не зависит от процесса, а только от начального и конечного состояний.

Свойства энтропии

1. *энтропия — функция состояния.*

адиабаты — это одновременно и изоэнтропы.

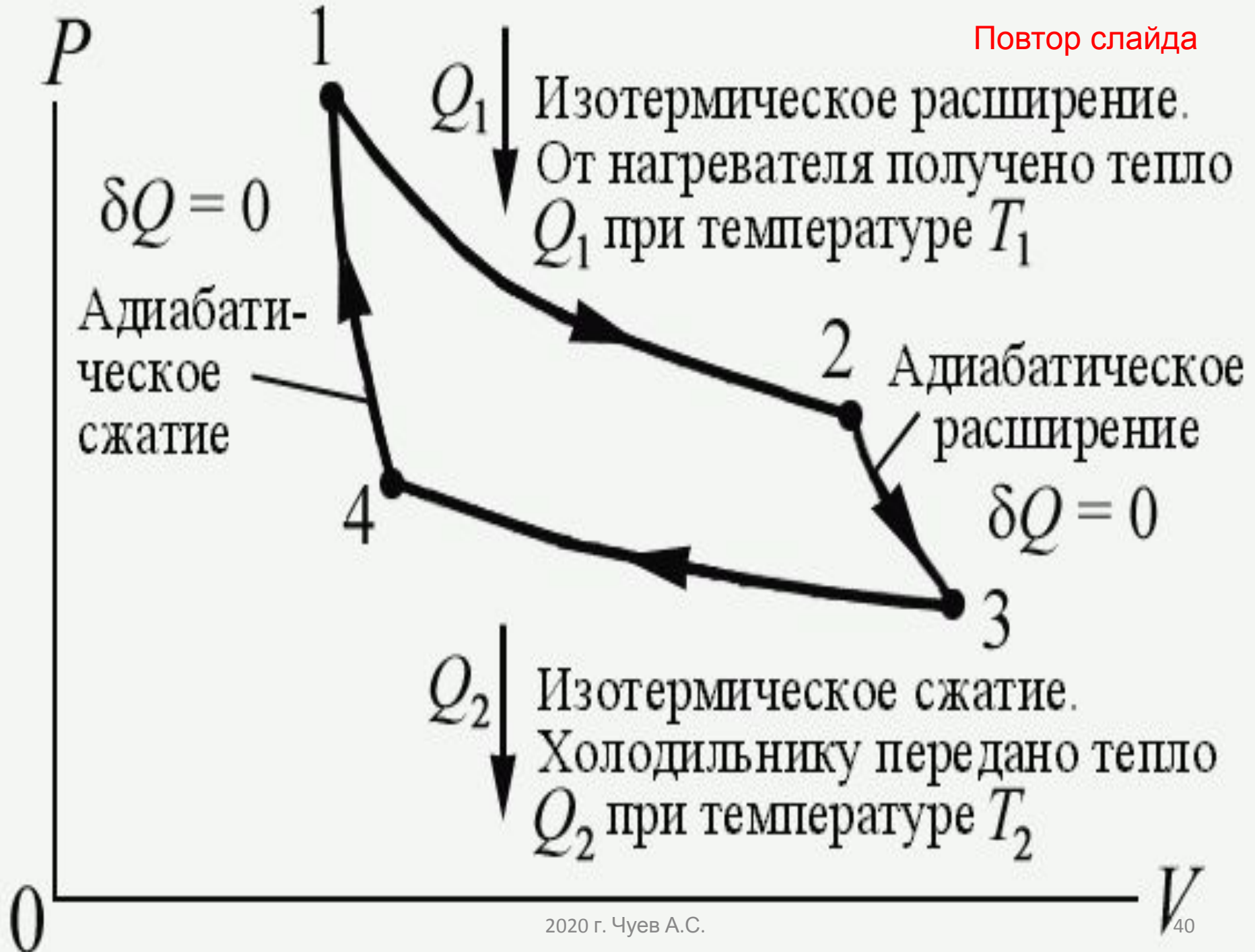
2. *Энтропия — величина аддитивная: энтропия макросистемы равна сумме энтропий ее отдельных частей.*

3. *энтропия замкнутой (т.е. теплоизолированной) макросистемы не уменьшается — она либо возрастает, либо остается постоянной*.*

Принцип возрастания энтропии замкнутых систем представляет собой еще одну формулировку второго начала термодинамики.

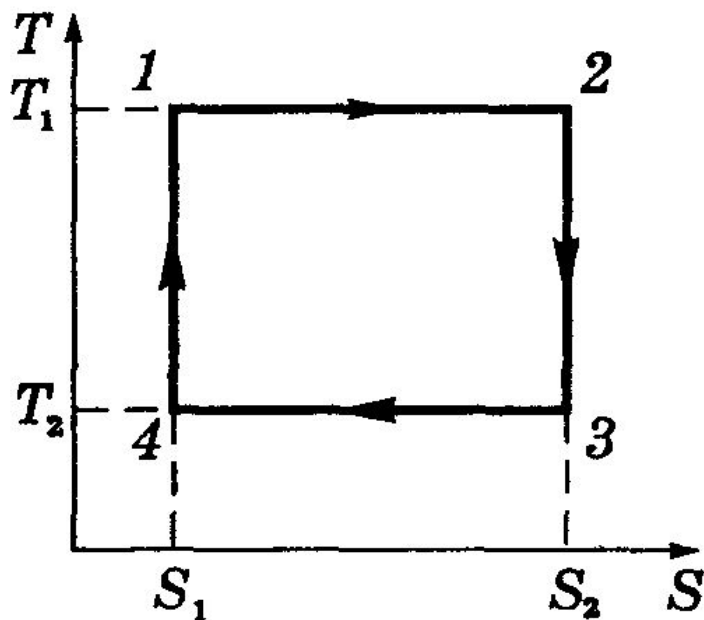
Формульное выражение второго начала термодинамики

$$dS \stackrel{=}{=} \frac{d'Q}{T} .$$



Данный цикл является обратимым (если его проводить бесконечно медленно). Он может быть проведен в обратном направлении, и при этом газ совершает отрицательную работу, нагреватель получает обратно тепло Q_1 , холодильник отдает газу тепло Q_2' , которое он получил в прямом цикле. Именно так в принципе работает любой бытовой холодильник.

Цикл Карно в координатах T-S



$$Q_1 = T_1(S_2 - S_1)$$

$$Q_2' = T_2(S_2 - S_1)$$

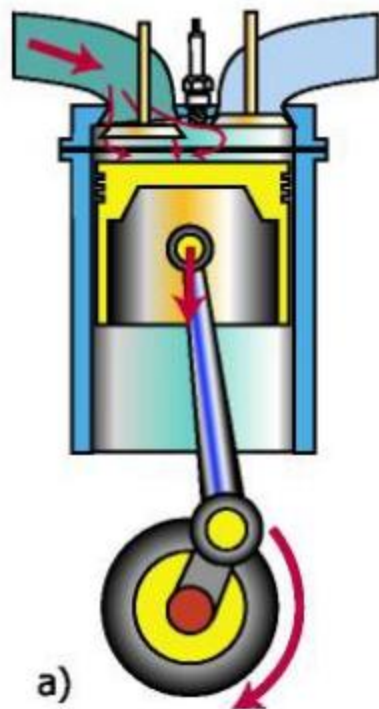
Подставив выражения Q_1 и Q_2' в формулу

КПД цикла Карно получим

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Рабочий цикл четырёхтактного карбюраторного двигателя

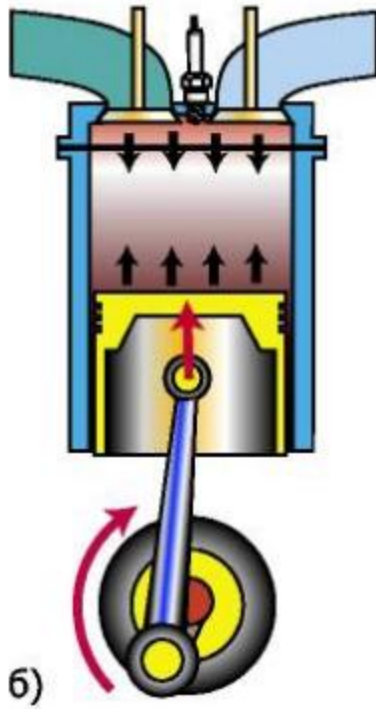
Впускной клапан открыт



а)

Впуск

Оба клапана закрыты



б)

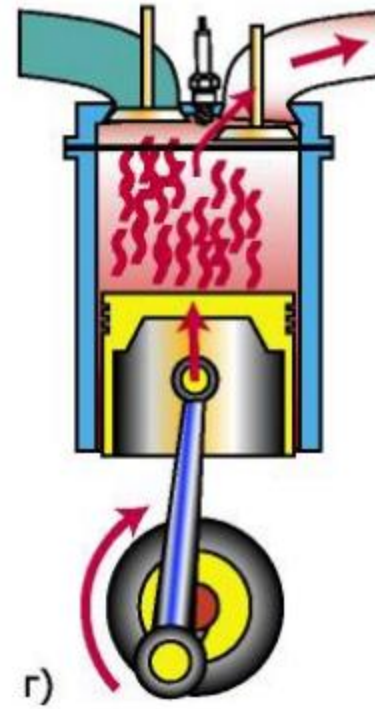
Сжатие



в)

Рабочий
ход

Выпускной клапан открыт



г)

Выпуск

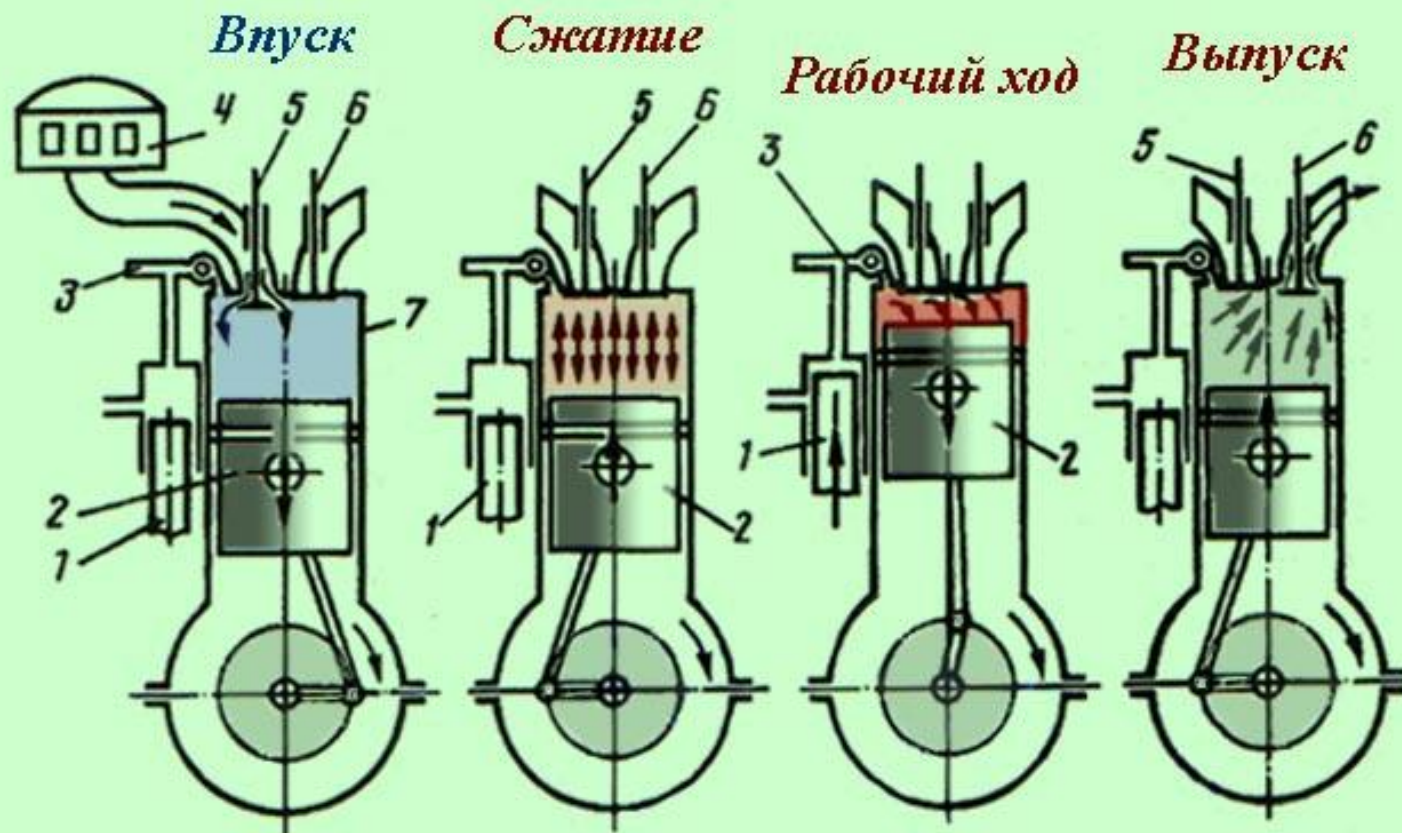
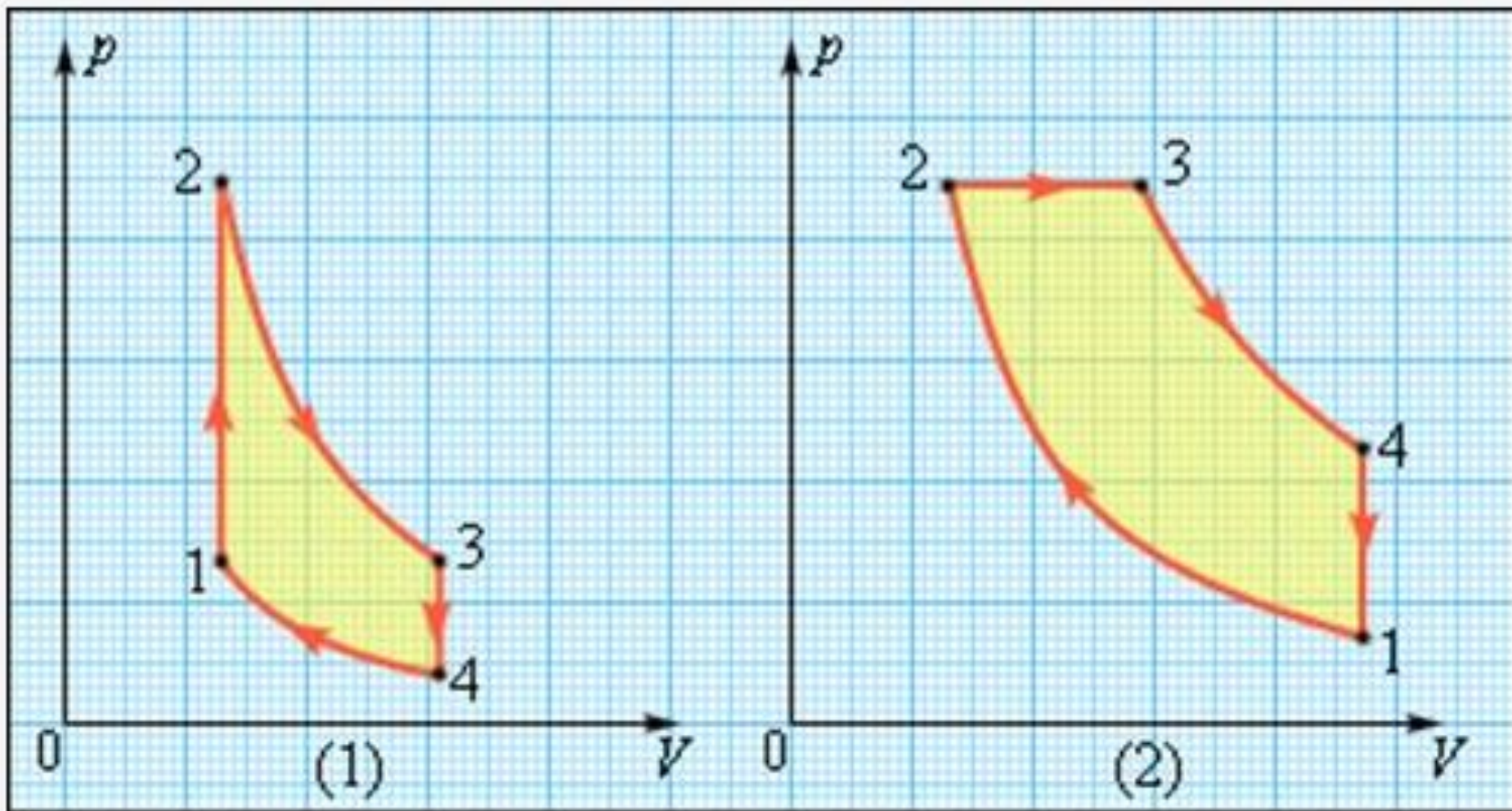


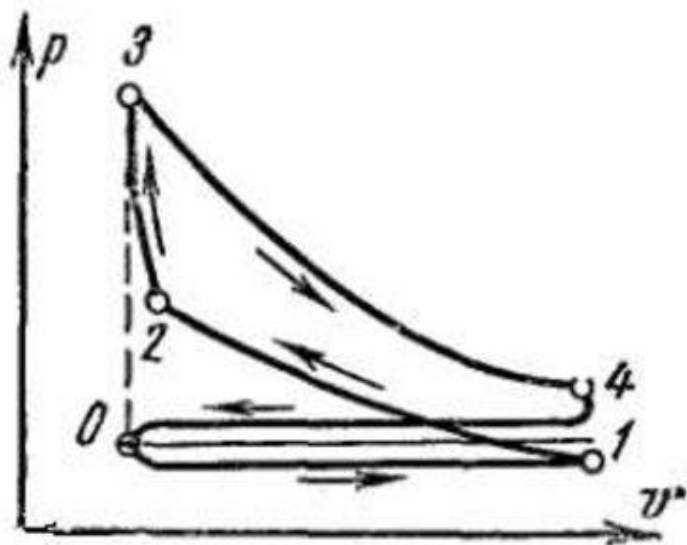
Рис. 2 Рабочий цикл четырехтактного дизеля

1 - топливный насос высокого давления; 2 - поршень; 3 - форсунка;
 4 - воздушный фильтр; 5 - впускной клапан; 6 - выпускной клапан; 7 - цилиндр



Циклы карбюраторного двигателя внутреннего сгорания (1) и дизельного двигателя (2)

Циклы ДВС



0-1 – процесс всасывания воздуха из атмосферы в цилиндр двигателя

1-2 – процесс сжатия воздуха

t_2 – начало воспламенения топлива

2-3 – изохорный подвод теплоты

3-4 – процесс адиабатного расширения продуктов сгорания

t_4 – открытие выхлопного клапана

4-0 – изохорный отвод теплоты (выхлоп дымовых газов в атмосферу)

Третье начало термодинамики

4. Теорема Нернста (1906). Эта теорема утверждает, что *при приближении температуры к абсолютному нулю энтропия макросистемы также стремится к нулю:*

$$S \rightarrow 0 \text{ при } T \rightarrow 0,$$

$$S(P, T) = \int_0^T \frac{C_P(T) dT}{T}$$

Теорема Нернста не может быть логически выведена из первых двух начал, поэтому ее часто называют *третьим началом термодинамики.*

Изменение энтропии в изопроцессах

Энтропия системы является функцией ее состояния, определенная с точностью до произвольной постоянной.

Если система совершает равновесный переход из состояния 1 в состояние 2, то изменение энтропии:

$$\Delta S_{1 \rightarrow 2} = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} = \int_1^2 \frac{dU + A}{T}$$

Изменение

энтропии:

$$\Delta S_{1 \rightarrow 2} = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} = \int_1^2 \frac{dU + A}{T}$$

Таким образом, по этой формуле можно определить энтропию лишь с точностью до аддитивной постоянной, т.е. **начало энтропии произвольно.**

Физический смысл имеет лишь разность энтропий.

Исходя из этого, найдем изменения энтропии в процессах идеального газа.

Вывод общей формулы изменения энтропии

По 1-му началу ТД: $TdS = dU + PdV$

$$dU = \nu C_V dT, \quad dA = PdV = \nu \frac{RT}{V} dV,$$

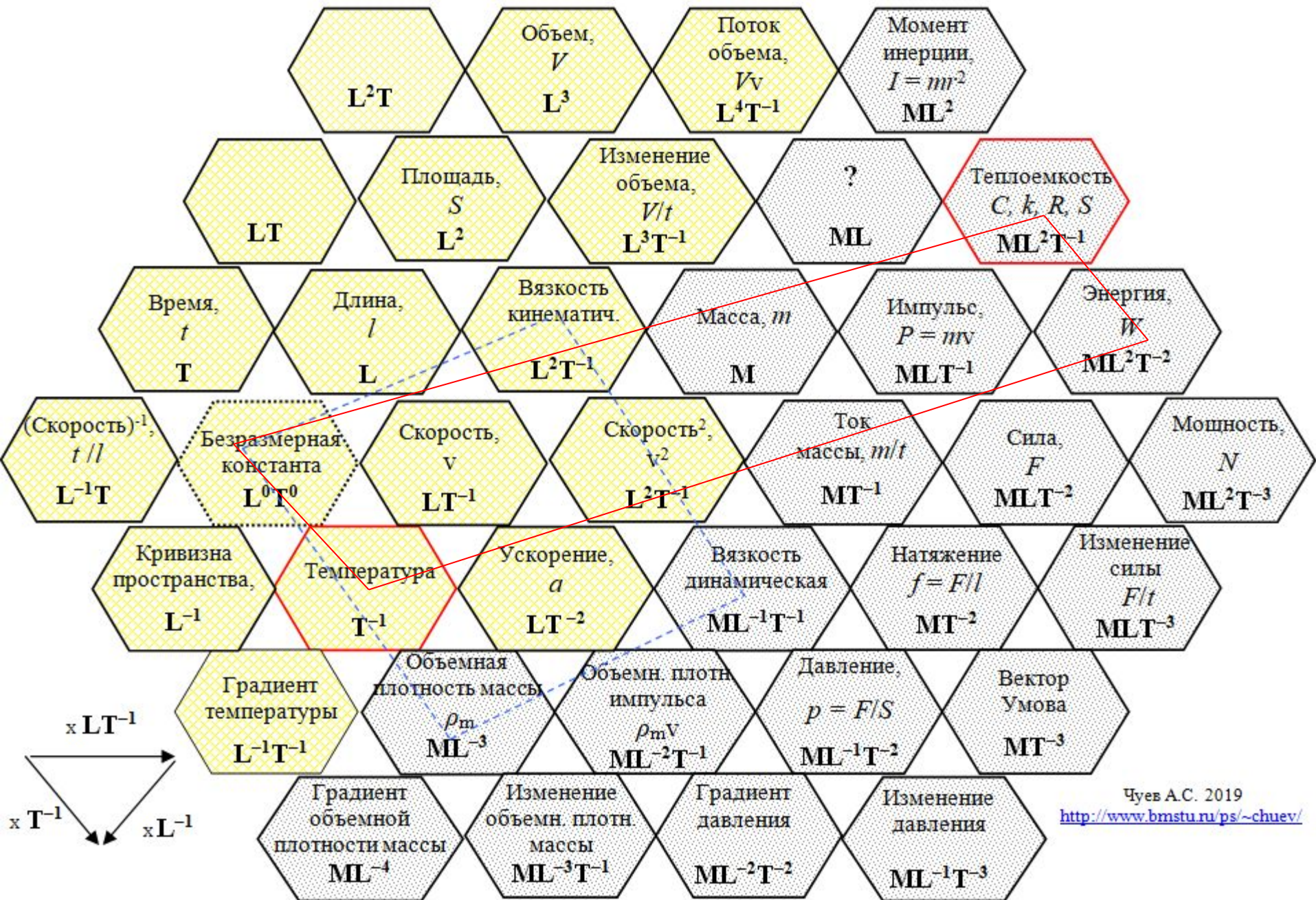
тогда:
$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \nu C_V \frac{dT}{T} + \int_1^2 \nu \frac{R}{V} dV$$

$$\Delta S = \nu C_V \ln \frac{T_2}{T_1} + \nu R \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Изменение энтропии в изопроцессах:

$$\Delta S = \nu C_V \ln \frac{T_2}{T_1} + \nu R \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Изохорический процесс:	$\Delta S = \nu C_V \ln \frac{T_2}{T_1},$	Т.К.	$V_1 = V_2$
Изобарический процесс:	$\Delta S = \nu C_p \ln \frac{T_2}{T_1},$	Т.К.	$P_1 = P_2$
Изотермический процесс:	$\Delta S = \nu R \ln \frac{V_2}{V_1},$	Т.К.	$T_1 = T_2$
Адиабатический процесс:	изоэнтропийный процесс $dQ = 0, \quad \Delta S = 0,$		



Конец лекции