

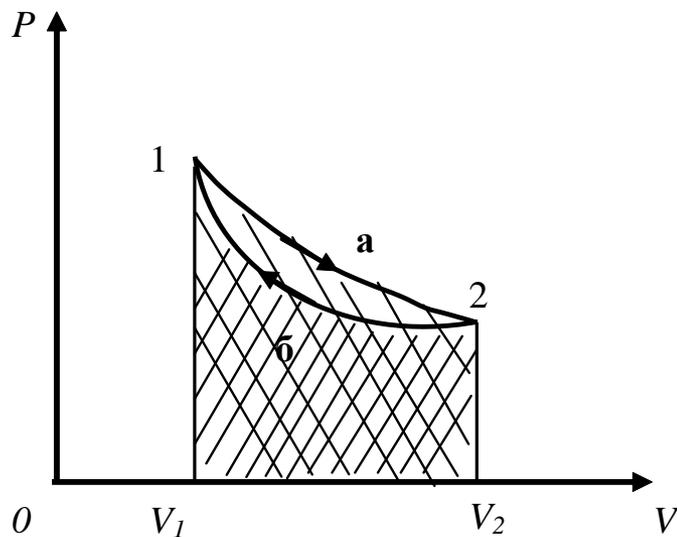
# Термодинамика

Прямой цикл

# Прямой цикл

Круговым процессом (или циклом) называется такой процесс, в результате которого система возвращается в исходное состояние.

## Прямой цикл:



$A_1 > 0$  система сама совершает работу по отношению к внешним телам (1а2).

$A_2 < 0$  внешние силы совершают работу над системой (2б1).

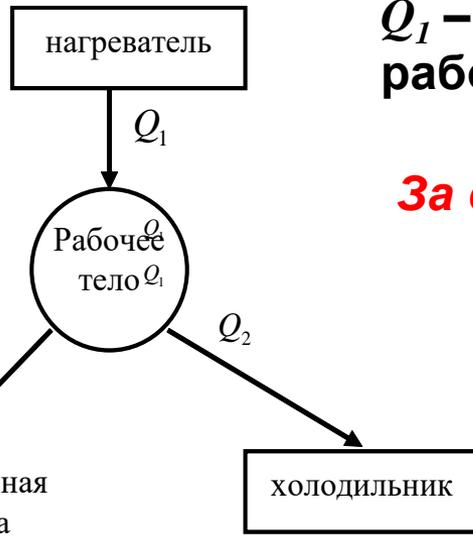
Рабочим телом является идеальный газ.

Суммарная работа, совершенная в результате этого цикла:

$$A = A_1 + (-A_2) = A_1 - A_2$$

# Прямой цикл

Вычислим коэффициент полезного действия (КПД) этого цикла.



$Q_1$  – количество теплоты, полученное рабочим телом от нагревателя.

$$Q_1 > 0$$

*За счет тепла  $Q_1$  газ расширяется по кривой 1a2.*

$$Q_1 = U_2 - U_1 + A_1$$

$(U_2 - U_1)$  – изменение внутренней энергии газа при его переходе из состояния 1 в состояние 2.

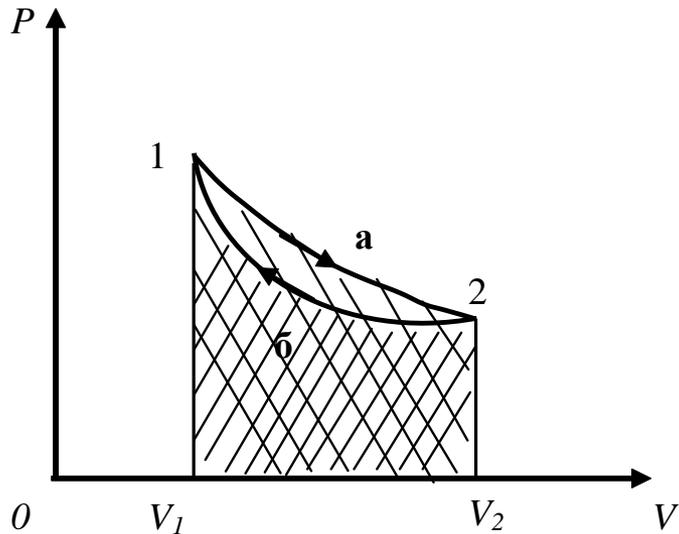
*Сжимаем газ (кривая 2б1), чтобы снова вернуть его в исходное состояние 1.*

При сжатии газ отдает какое-то количество тепла  $Q_2$  холодильнику.

$Q_2$  тепло, отданное рабочим телом, считается отрицательным  $Q_2 < 0$

$$-Q_2 = U_1 - U_2 - A_2$$

# Прямой цикл



Процесс 1а2

$$Q_1 = U_2 - U_1 + A_1$$

Процесс 2б1

$$-Q_2 = U_1 - U_2 - A_2$$

$$Q_1 - Q_2 = A_1 - A_2$$

$$Q_1 - Q_2 = A \quad \text{работа против внешних сил}$$

## Прямой цикл

$$Q_1 - Q_2 = A$$

Цикл, в котором часть теплоты превращается в работу, называется прямым циклом.

Во всех прямых циклах кривая расширения газа расположена выше кривой сжатия газа.

Машина, работающая по прямому циклу, называется тепловой машиной.

Коэффициент полезного действия (КПД) тепловой машины  $\eta$  – это отношение работы к количеству теплоты, полученной от нагревателя.

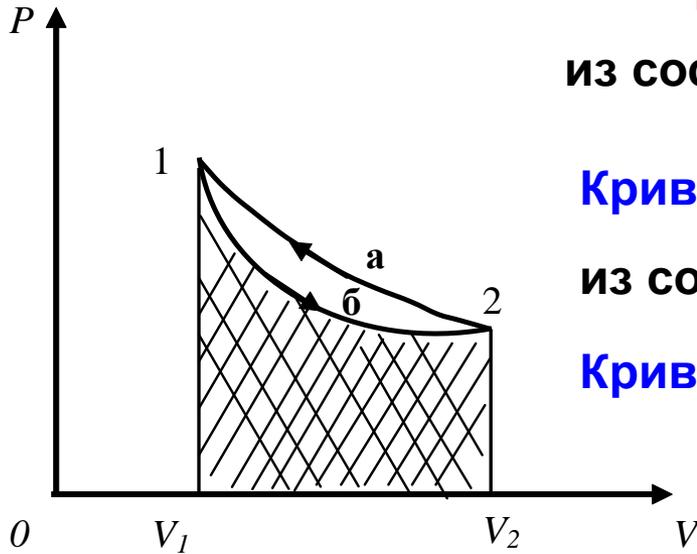
$$\eta = \frac{A}{Q_1}$$

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

# Термодинамика

Обратный цикл

## Обратный цикл



из состояния 1 в состояние 2 по кривой 162

Кривая 162 – это кривая расширения газа  $A_1 > 0$ .

из состояния 2 в состояние 1 по кривой 2a1

Кривая 2a1 – это кривая сжатия газа  $A_2 < 0$ .

$$A = A_1 + (-A_2) = A_1 - A_2 < 0$$

$$|A_2| > |A_1|$$

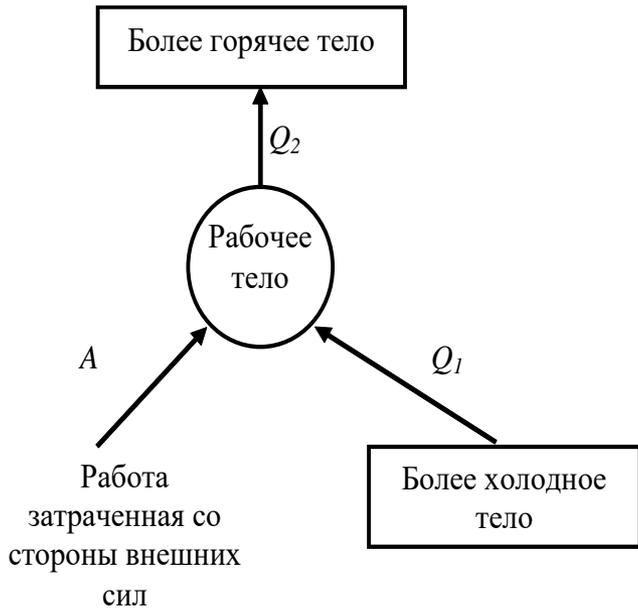
Так как суммарная работа отрицательна ( $A < 0$ ), то получается, что не рабочее тело совершило работу против внешних сил, а наоборот, внешние силы совершили работу над телом.

# Обратный цикл

Обратным циклом называется цикл, на осуществление которого расходуется работа со стороны внешних по отношению к системе сил.

$Q_1$  – количество теплоты, полученное рабочим телом при расширении.

$(-Q_2)$  – количество теплоты, отданное им при сжатии



$$Q_1 = U_2 - U_1 + A_1,$$

$$-Q_2 = U_1 - U_2 - A_2$$

$$Q_1 - Q_2 = A_1 - A_2 = A$$

$$Q_2 = Q_1 + A$$

Машина, работающая по обратному циклу, называется холодильной машиной.

# Термодинамика

**Обратимые и необратимые процессы**

# Обратимые и необратимые процессы

Обратимым процессом называется такой процесс, который может протекать как в прямом, так и в обратном направлениях, причем при протекании в обратном направлении система проходит через те же самые состояния, что и при прямом процессе.

При этом ни в окружающей среде, ни в самой системе не возникает никаких остаточных изменений.

Процессы, не удовлетворяющие условиям обратимости, называются необратимыми.

Все реальные процессы необратимы.

Обратимые процессы в чистом виде в природе не реализуются.

Обратимые процессы – это идеализация реальных процессов.

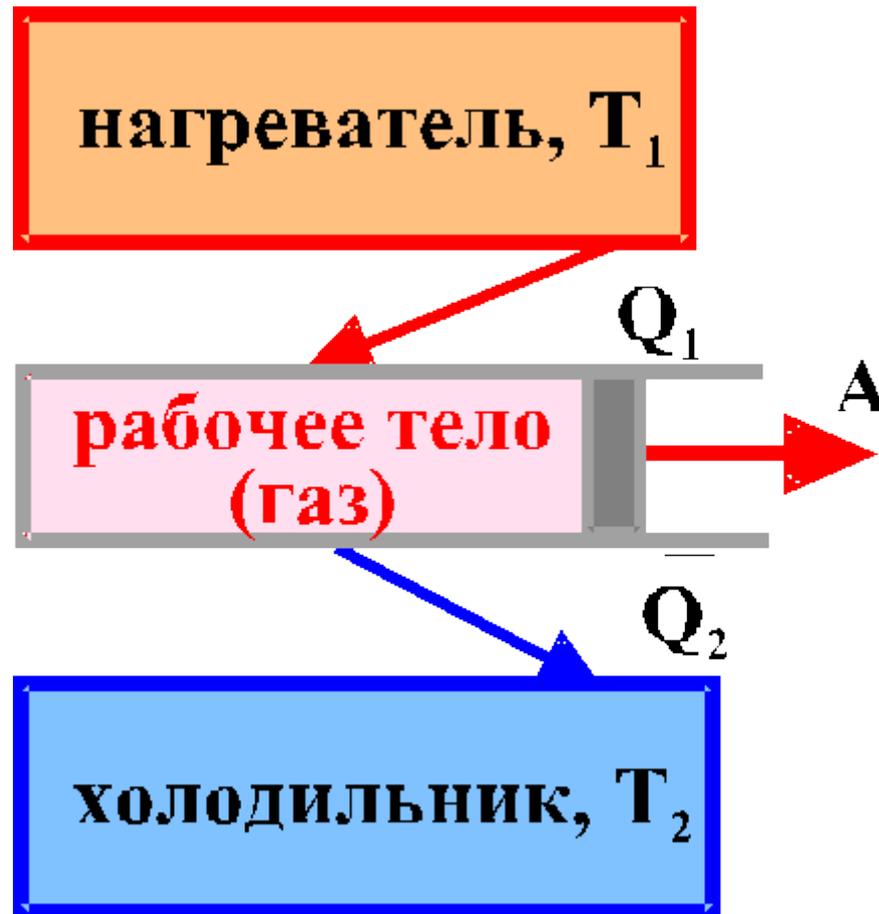
# Термодинамика

Цикл Карно

# Цикл Карно

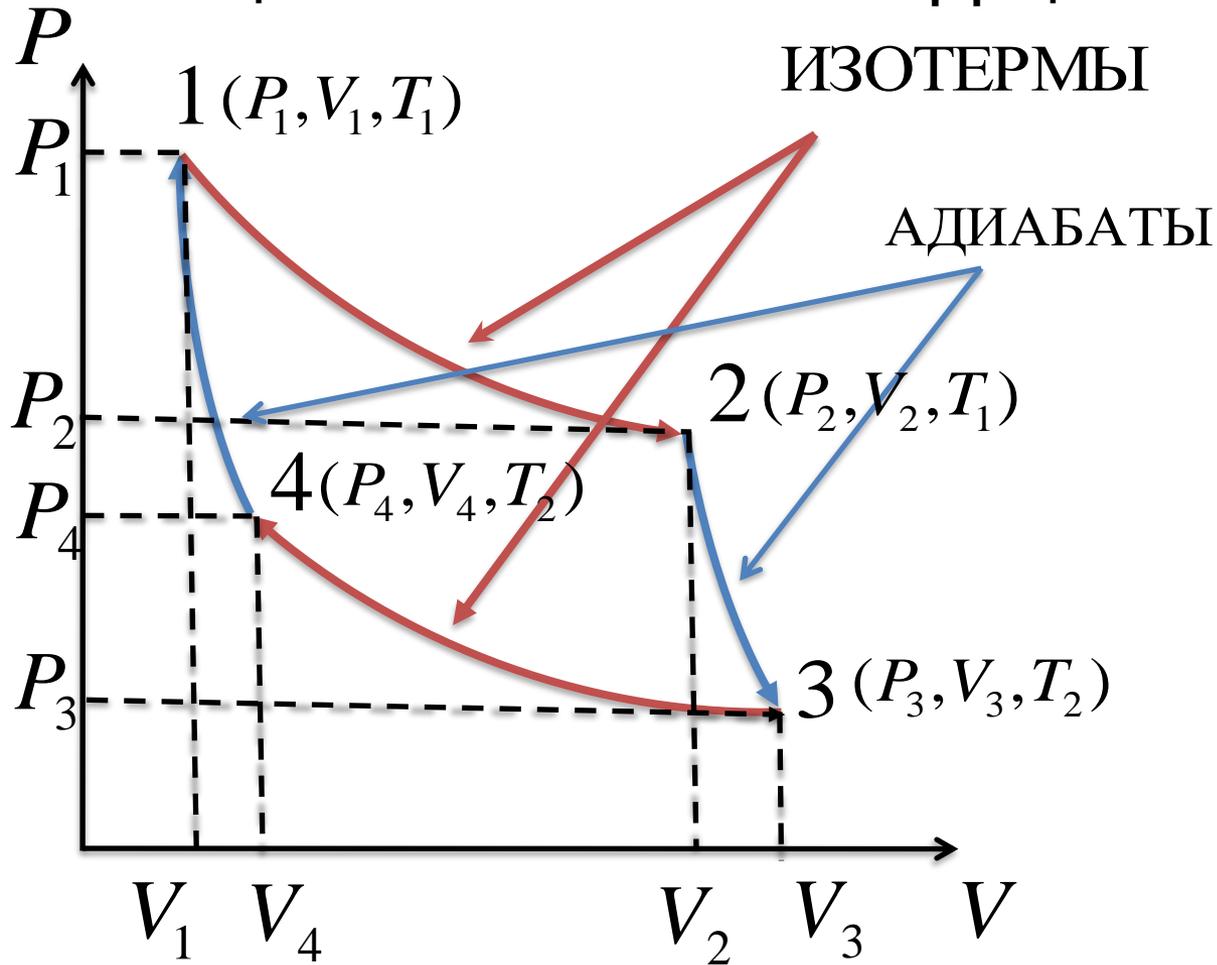
## Теорема Карно:

КПД любой обратимой тепловой машины, работающей по циклу Карно, не зависит от природы рабочего тела и устройства машины, а является функцией только температуры нагревателя  $T_1$  и холодильника  $T_2$ .



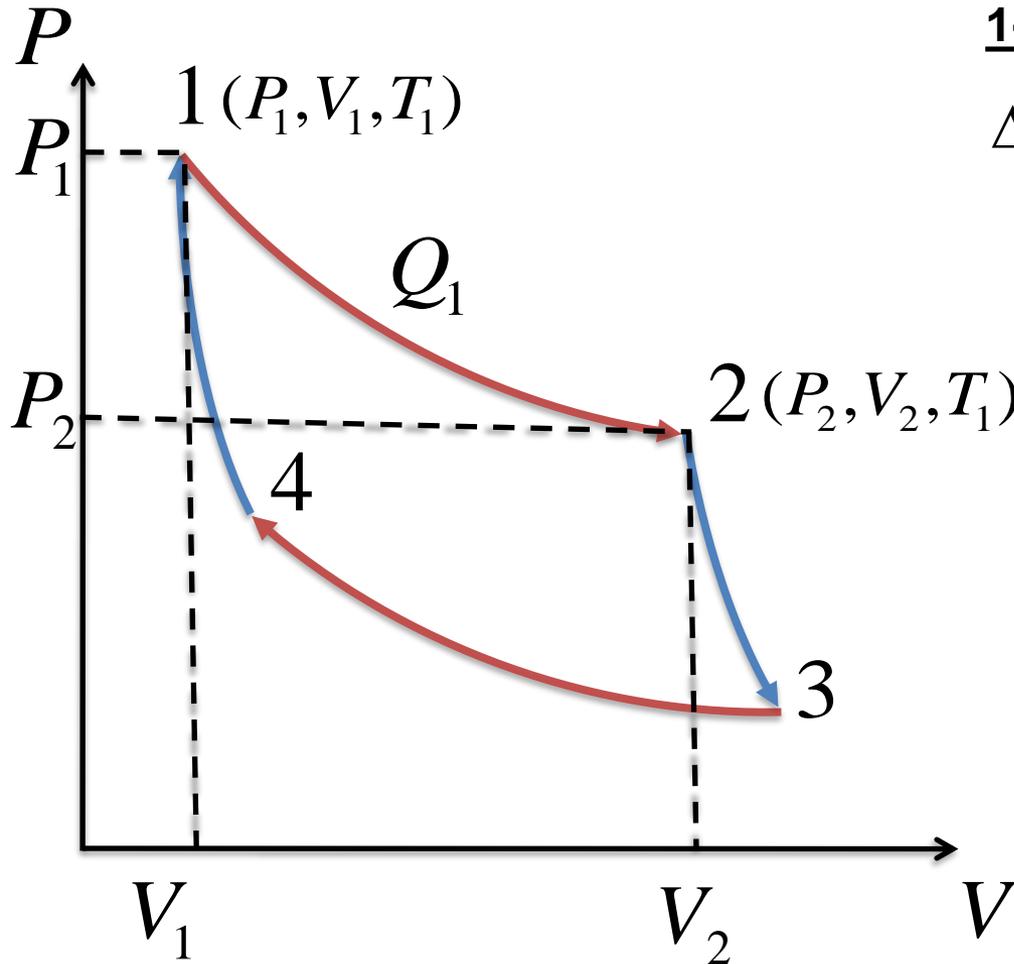
# Цикл Карно

Какой цикл имеет наибольший коэффициент полезного действия (КПД)?



Прямой цикл Карно

# Цикл Карно



1-2 изотермическое расширение

$$\Delta T = 0 \longrightarrow \Delta U = 0$$

$$Q_1 = A_1$$

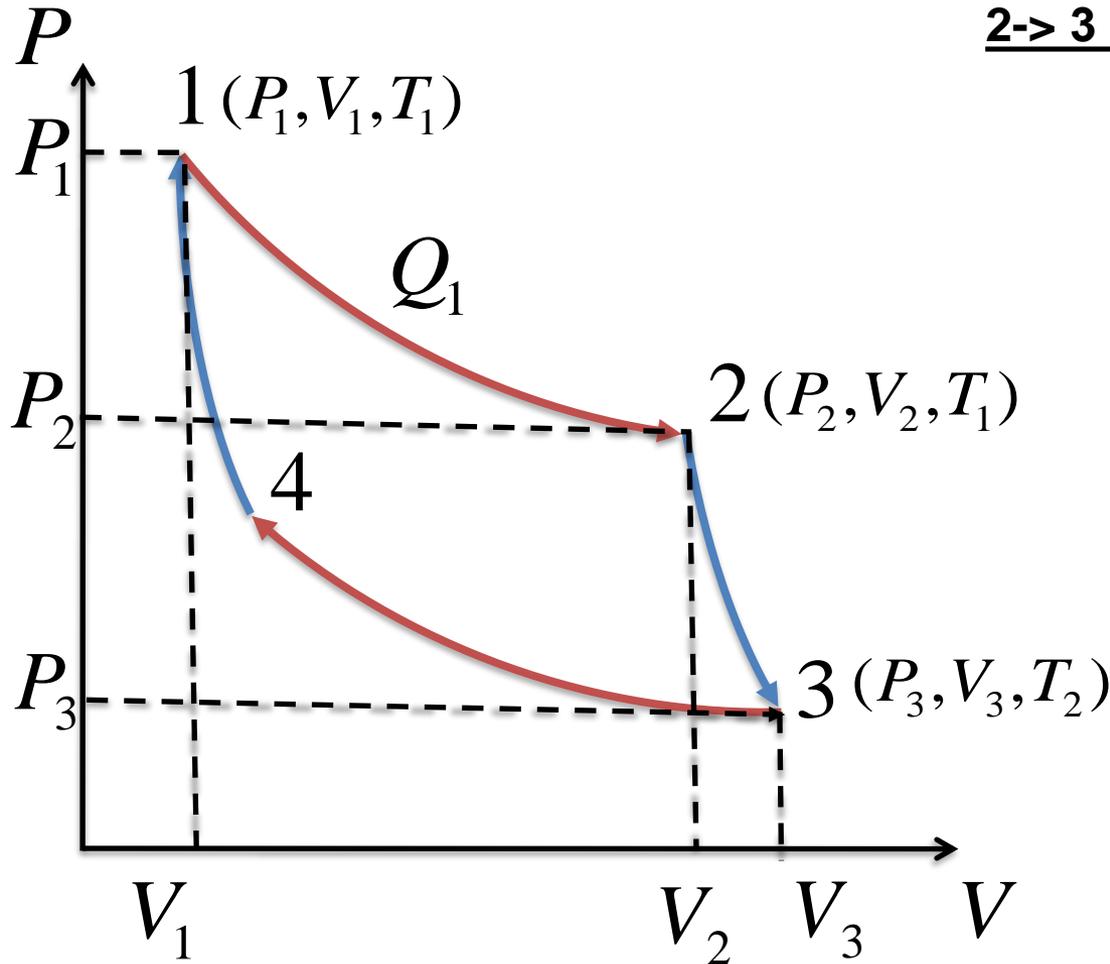
$$A_1 = Q_1 = RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

# Цикл Карно

2-> 3 адиабатическое расширение

$$T_2 < T_1$$

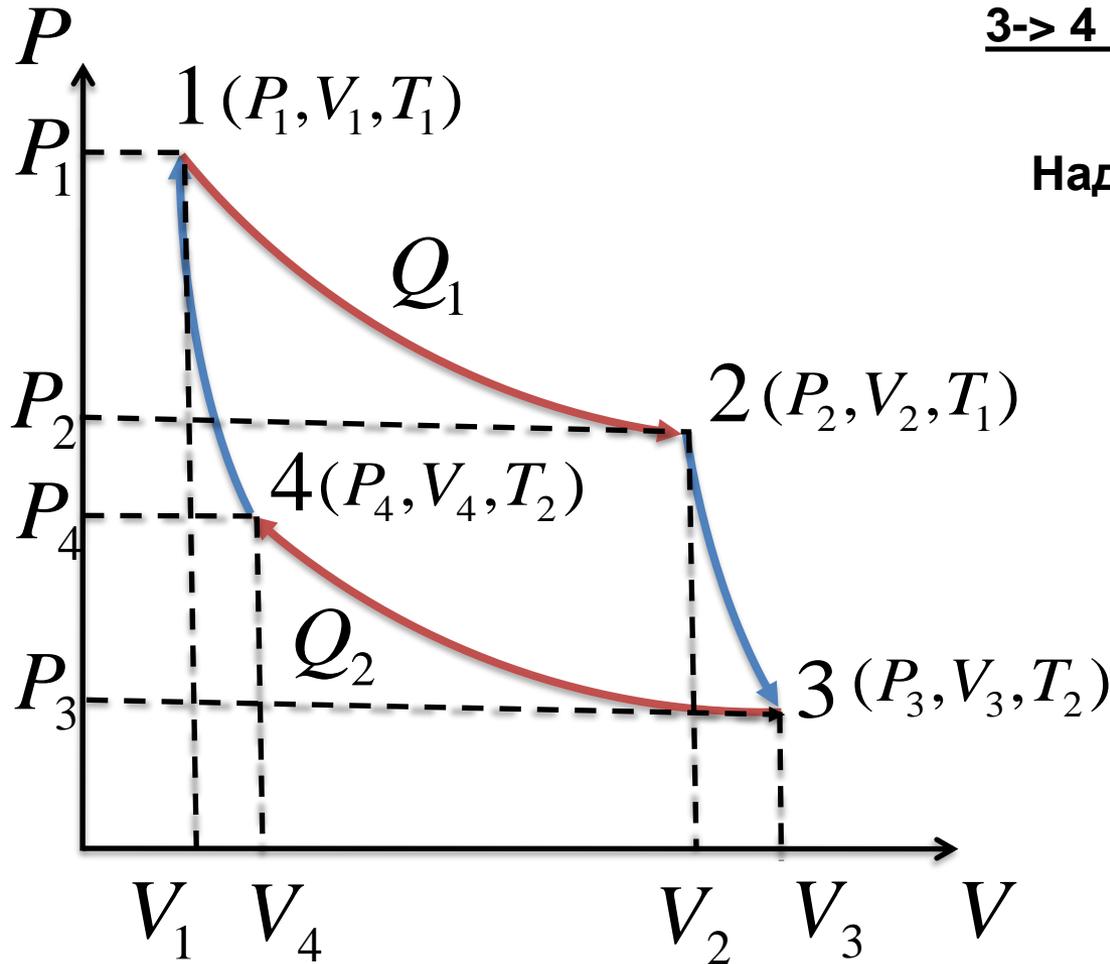
$$\Delta Q = 0$$



$$A_2 = \frac{R}{\gamma - 1} (T_1 - T_2)$$

При адиабатном процессе к газу тепло не подводится и газ совершает работу за счет своей внутренней энергии, в результате газ охлаждается.

# Цикл Карно



3-→ 4 изотермическое сжатие

Над газом совершается работа.

$$\Delta T = 0 \longrightarrow \Delta U = 0$$

$$A_3 = -Q_2 = RT_2 \ln \frac{V_4}{V_3}$$

ИЛИ

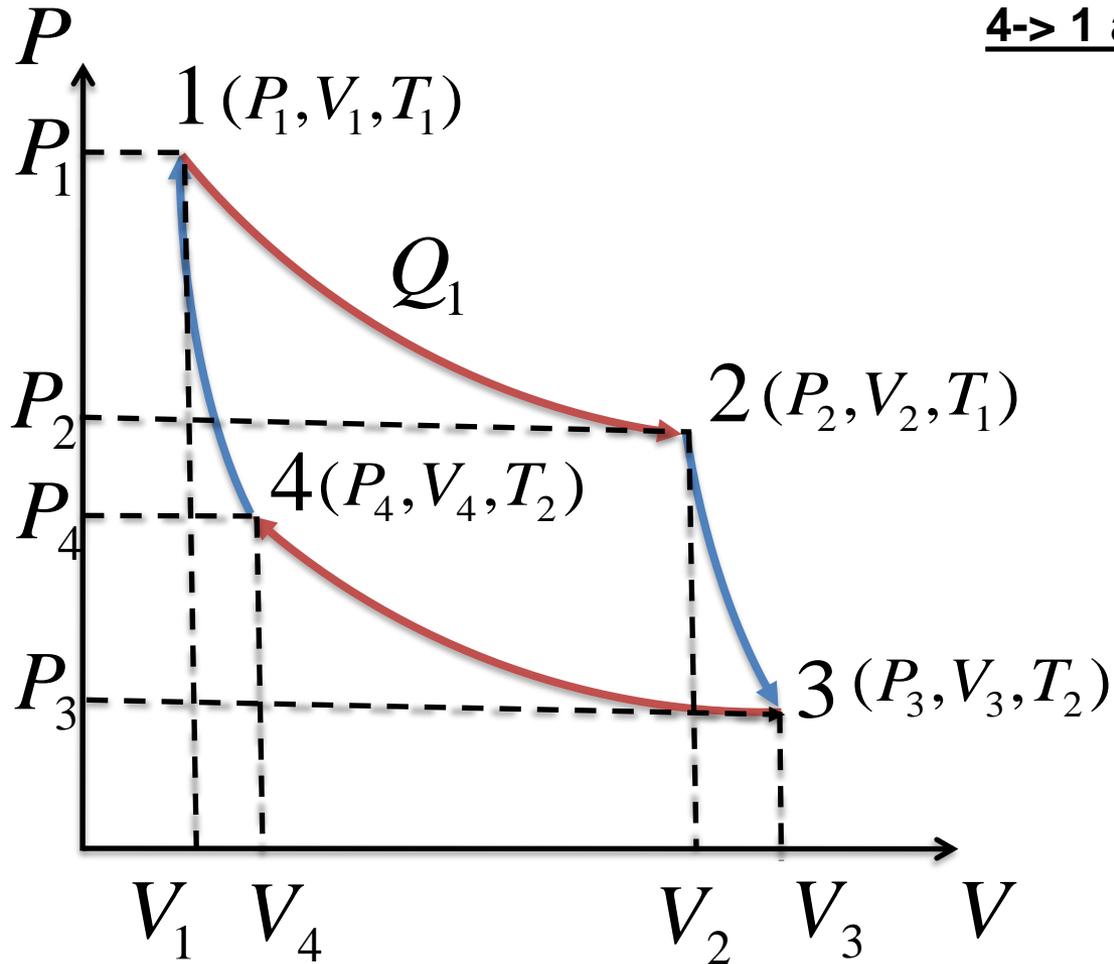
$$A_3 = Q_2 = RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}$$

# Цикл Карно

4-→ 1 адиабатическое сжатие

$$T_2 < T_1$$

$$\Delta Q = 0$$



$$A_4 = \frac{R}{\gamma - 1} (T_2 - T_1)$$

## Цикл Карно

Общая работа цикла Карно:

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4$$

Для двух адиабат 2-3 и 4-1 цикла Карно запишем их уравнения:

$$T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1} \quad \text{и} \quad T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_4^{\gamma-1}$$

$$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{\gamma-1} \quad \text{или} \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$$

$$A = R(T_1 - T_2) \ln \beta$$

$$\ln \beta = \ln \frac{V_2}{V_1} = \ln \frac{V_3}{V_4}$$

# Цикл Карно

Полезная работа для цикла Карно:

$$A = Q_1 - Q_2$$

КПД для цикла Карно:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} - RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}}$$

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

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

# Цикл Карно

Машина, работающая по прямому циклу Карно, является идеальной тепловой машиной.

Для теплотехники цикл Карно – это цикл, к которому нужно стремиться при создании реальных тепловых машин.

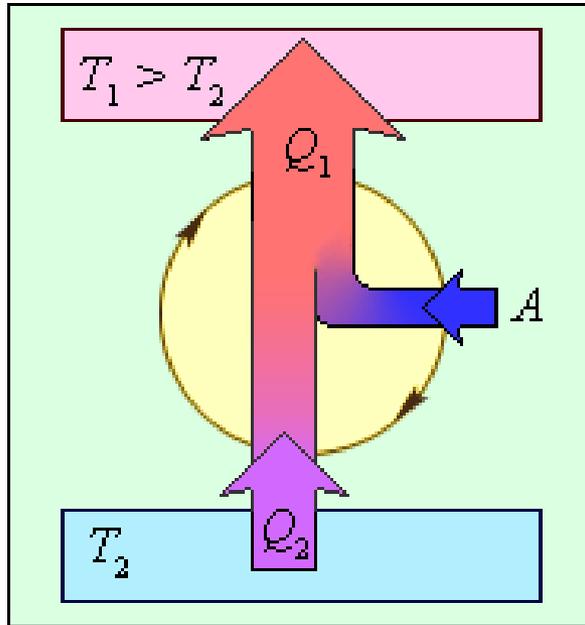
Повышения КПД: повышение температуры нагревателя и понижение температуры тел, выполняющих роль холодильников.

Если  $T_2 = T_1$ , то КПД цикла Карно равен нулю, т.е. если все тела системы находятся в тепловом равновесии, то нельзя превратить теплоту в работу.

# Цикл Карно

Так как все процессы в цикле Карно являются обратимыми, то цикл Карно можно осуществить в обратном направлении.

Обратный цикл Карно лежит в основе работы идеальной холодильной машины:



$A$  – работа внешних сил.

Холодильный коэффициент  $\varepsilon$  (иногда его называют коэффициентом полезного действия холодильной машины) – это отношение количества тепла  $Q_2$ , отводимого от охлаждаемого тела за цикл, к затраченной работе:

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{A}$$

$$\varepsilon = \frac{1 - \eta}{\eta}$$

## Второе начало термодинамики

1. Невозможно осуществить такой периодический процесс, единственным результатом которого было бы превращение теплоты, полученной от нагревателя, в работу.
2. Тепло не может самопроизвольно переходить от тела менее нагретого, к телу, более нагретому (т.е. без совершения работы).

Первое начало термодинамики не рассматривало вопрос о направлении происходящих процессов.

В формулировках второго начала термодинамики направление процесса всегда, прямо или косвенно, но указывается.

# Второе начало термодинамики

КПД тепловой машины:

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

КПД идеальной тепловой машины:

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

Для идеальной тепловой машины:

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

Для реальной тепловой машины:

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} < \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

## Второе начало термодинамики

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

неравенство Клаузиуса, оно тоже является одной из формулировок второго начала термодинамики.

Знак равенства относится к обратимому циклу, а знак неравенства – к необратимому.

### *Характеристики изопроцессов в газах*

	Название процесса			
	Изохорический	Изобарический	Изотермический	Адиабатический
Условие протекания процесса	$V = \text{const}$	$P = \text{const}$	$T = \text{const}$	$\delta Q = 0$ $\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{i+2}{i}$
Связь между параметрами состояния	$\frac{P}{T} = \text{const}$	$\frac{V}{T} = \text{const}$ $PdV = \frac{m}{\mu} RdT$	$PV = \text{const}$	$PV^\gamma = \text{const}$ $TV^{\gamma-1} = \text{const}$ $T^\gamma P^{\gamma-1} = \text{const}$
Первое начало	$\delta Q = dU$	$\delta Q = dU + \delta A$	$\delta Q = \delta A$	$dU = \delta A$

## Характеристики изопроцессов в газах

	Название процесса			
	Изохорический	Изобарический	Изотермический	Адиабатический
Работа в процессе	$\delta A = 0$ $A = 0$	$\delta A = PdV$ $A = P(V_2 - V_1)$ $A = \frac{m}{\mu} R \Delta T$	$\delta A = PdV$ $A = \int_{V_1}^{V_2} PdV$ $A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$ $A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{P_2}{P_1}$	$\delta A = PdV = -dU$ $\delta A = -\frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R dT$ $A = -\Delta U = -C_V(T_2 - T_1)$ $A = \frac{P_1 V_1}{\gamma - 1} \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right]$ $A = \frac{m}{\mu} \frac{RT_1}{\gamma - 1} \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right]$

## Характеристики изопроцессов в газах

	Название процесса			
	Изохорический	Изобарический	Изотермический	Адиабатический
Количество теплоты, сообщённое в процессе	$\delta Q = C_V dT$ $Q = C_V (T_2 - T_1)$	$\delta Q = C_P dT$ $Q = C_P (T_2 - T_1)$ $Q = \frac{m}{\mu} R \Delta T \left( \frac{i}{2} + 1 \right)$	$\delta Q = \delta A$ $Q = A$	$\delta Q = 0$ $Q = 0$

## *Характеристики изопроцессов в газах*

	Название процесса			
	Изохорический	Изобарический	Изотермический	Адиабатический
Теплоёмкость	$C_V = \frac{m}{\mu} \frac{R}{(\gamma - 1)}$ $C_V = \frac{i}{2} R$	$C_P = \frac{m}{\mu} \frac{\gamma R}{(\gamma - 1)}$ $C_P = \frac{m}{\mu} \frac{dQ}{dT}$	$C_T = \pm \infty$	$C_{ад} = 0$