

Термодинамика

Адиабатный процесс

Адиабатный процесс

Адиабатным (адиабатическим) процессом называется процесс, идущий без теплообмена с окружающей средой.

Адиабатный процесс можно осуществить двумя способами:

1. осуществить хорошую теплоизоляцию, что практически довольно трудно сделать;
2. провести процесс настолько быстро, чтобы не успел произойти теплообмен с окружающей средой.

Согласно первому началу термодинамики:

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

$$\Delta Q = 0$$

$$\Delta A = -\Delta U$$

Адиабатный процесс

$$dA = -dU$$

$$dA = PdV$$

$$dU = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R dT$$

$$PdV = -\frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R dT$$

$$PV = \frac{m}{\mu} RT$$



$$P = \frac{m}{\mu} \frac{RT}{V}$$

$$\cancel{\frac{m}{\mu}} \cancel{\frac{RT}{V}} dV = -\cancel{\frac{m}{\mu}} \cancel{\frac{i}{2}} R dT$$

$$\frac{dT}{T} = -\frac{2}{i} \frac{dV}{V}$$

Адиабатный процесс

$$\frac{dT}{T} = -\frac{2}{i} \frac{dV}{V}$$

$$\int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = -\frac{2}{i} \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V}$$

$$\ln \frac{T_2}{T_1} = -\frac{2}{i} \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Коэффициент Пуассона

$$\gamma = \frac{i+2}{i} \longrightarrow \frac{2}{i} = \gamma - 1$$

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}$$

$$TV^{\gamma-1} = \text{const}$$

уравнение адиабатного процесса

Адиабатный процесс

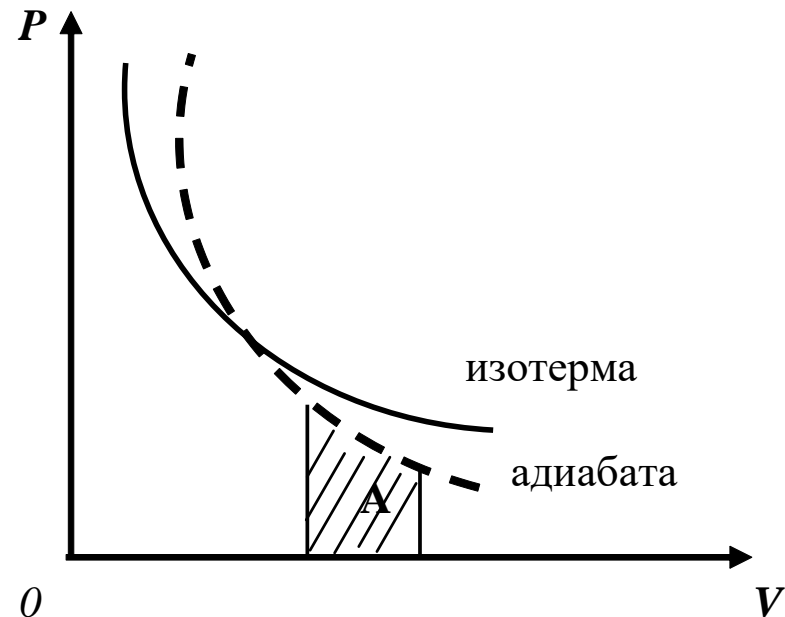
$$TV^{\gamma-1} = \text{const}$$

$$V = \frac{m}{\mu} \frac{RT}{P}$$

$$T = \frac{PV}{R} \frac{\mu}{m}$$

$$TP^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = \text{const}$$

$$PV^{\gamma} = \text{const}$$



Адиабатный процесс

Работа при адиабатном процессе: $dA = -dU$

$$dU = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R dT$$

$$A = \int dA = -\frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R \int_{T_1}^{T_2} dT = -\frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R (T_2 - T_1) = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R T_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right)$$

$$\frac{i}{2} = \frac{1}{\gamma - 1}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1}$$

$$A = \frac{m}{\mu} \frac{R T_1}{\gamma - 1} \left\{ 1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right\}$$

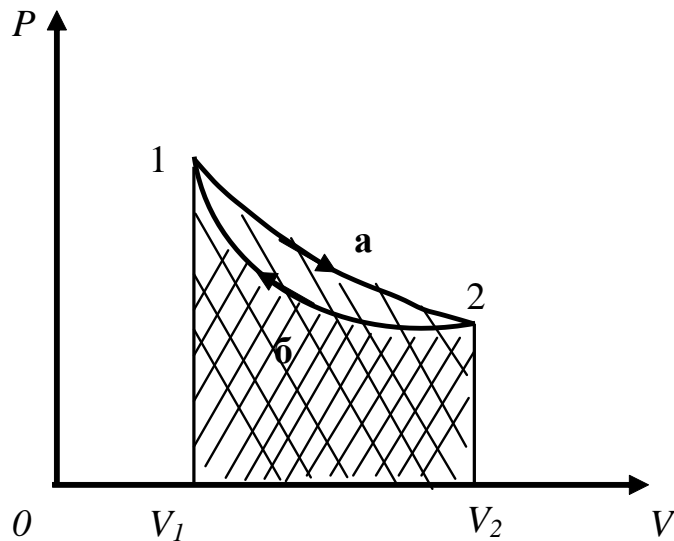
Термодинамика

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).

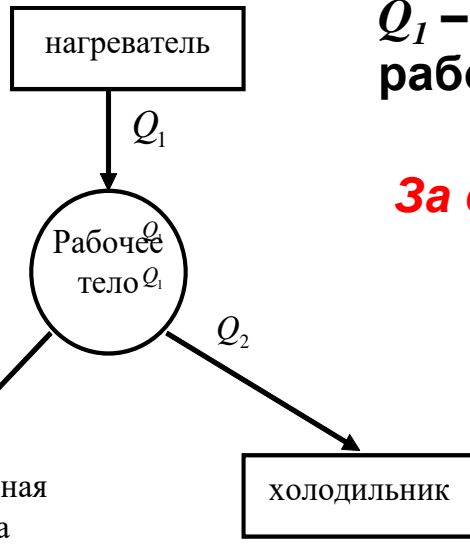
Рабочим телом является идеальный газ.

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.

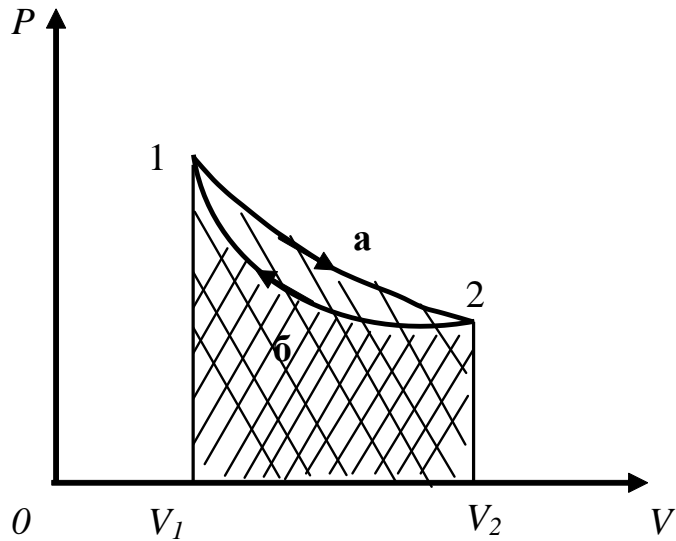
Сжимаем газ (кривая 2б1), чтобы снова вернуть его в исходное состояние 1.

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 η – это отношение работы к количеству теплоты, полученной от нагревателя.

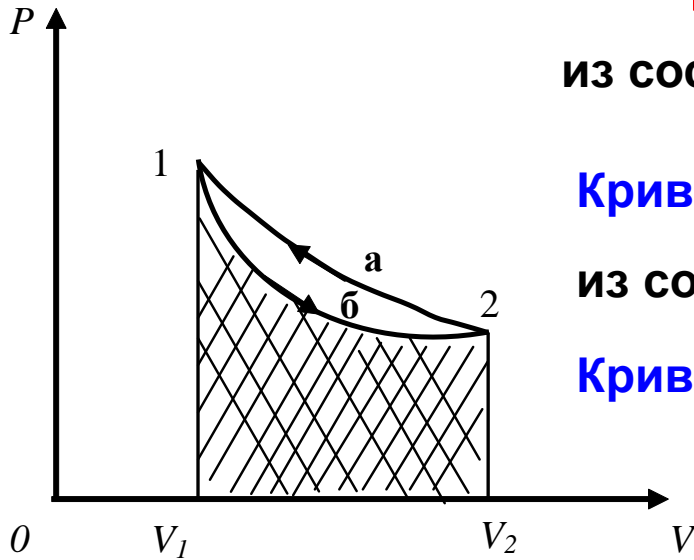
$$\eta = \frac{A}{Q_1}$$

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

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 $A_2 < 0$.

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

$$|A_2| > |A_1|$$

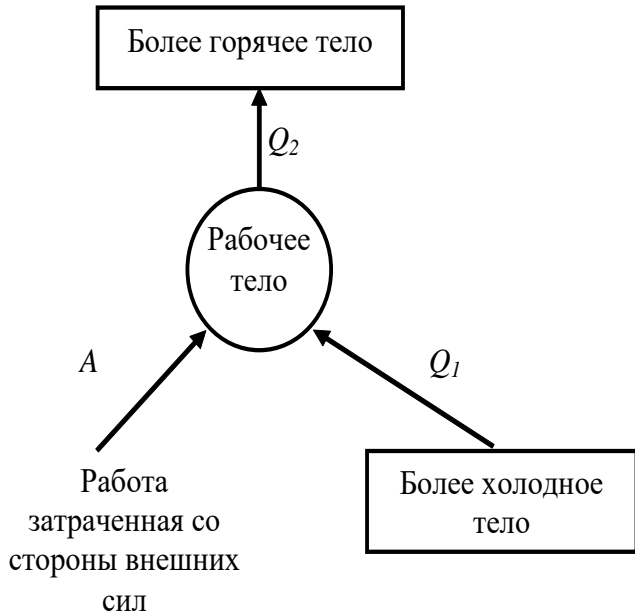
Так как суммарная работа отрицательна ($A < 0$), то получается, что не рабочее тело совершило работу против внешних сил, а наоборот, внешние силы совершили работу над телом.

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.

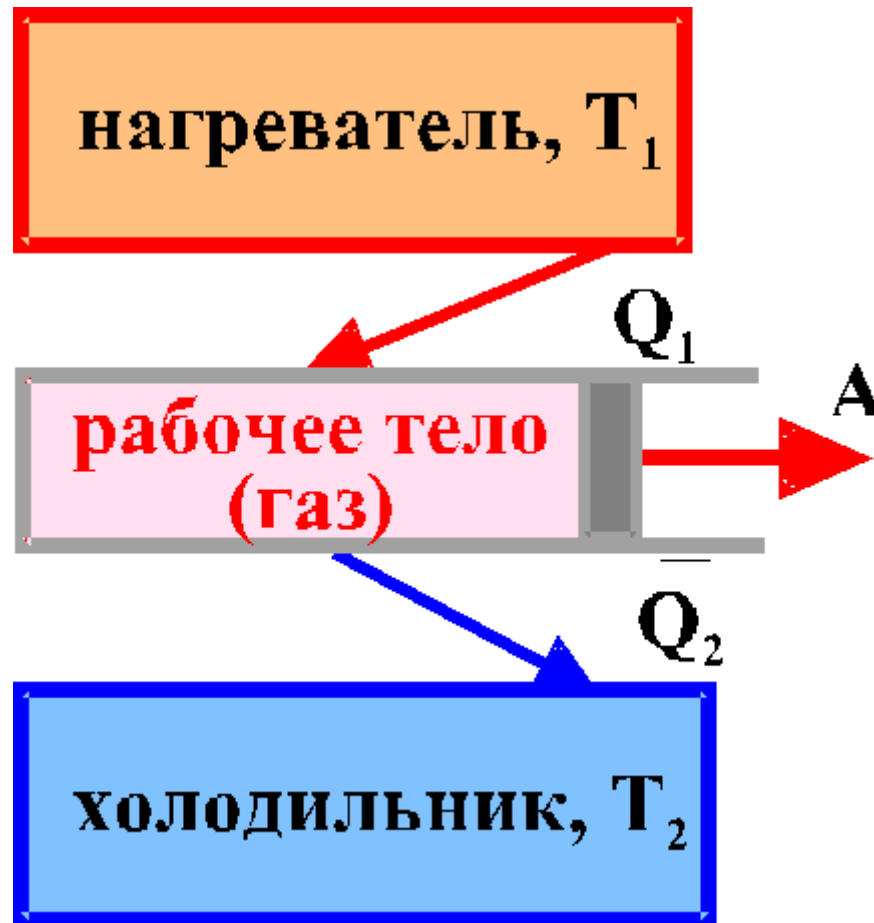
Термодинамика

Цикл Карно

Цикл Карно

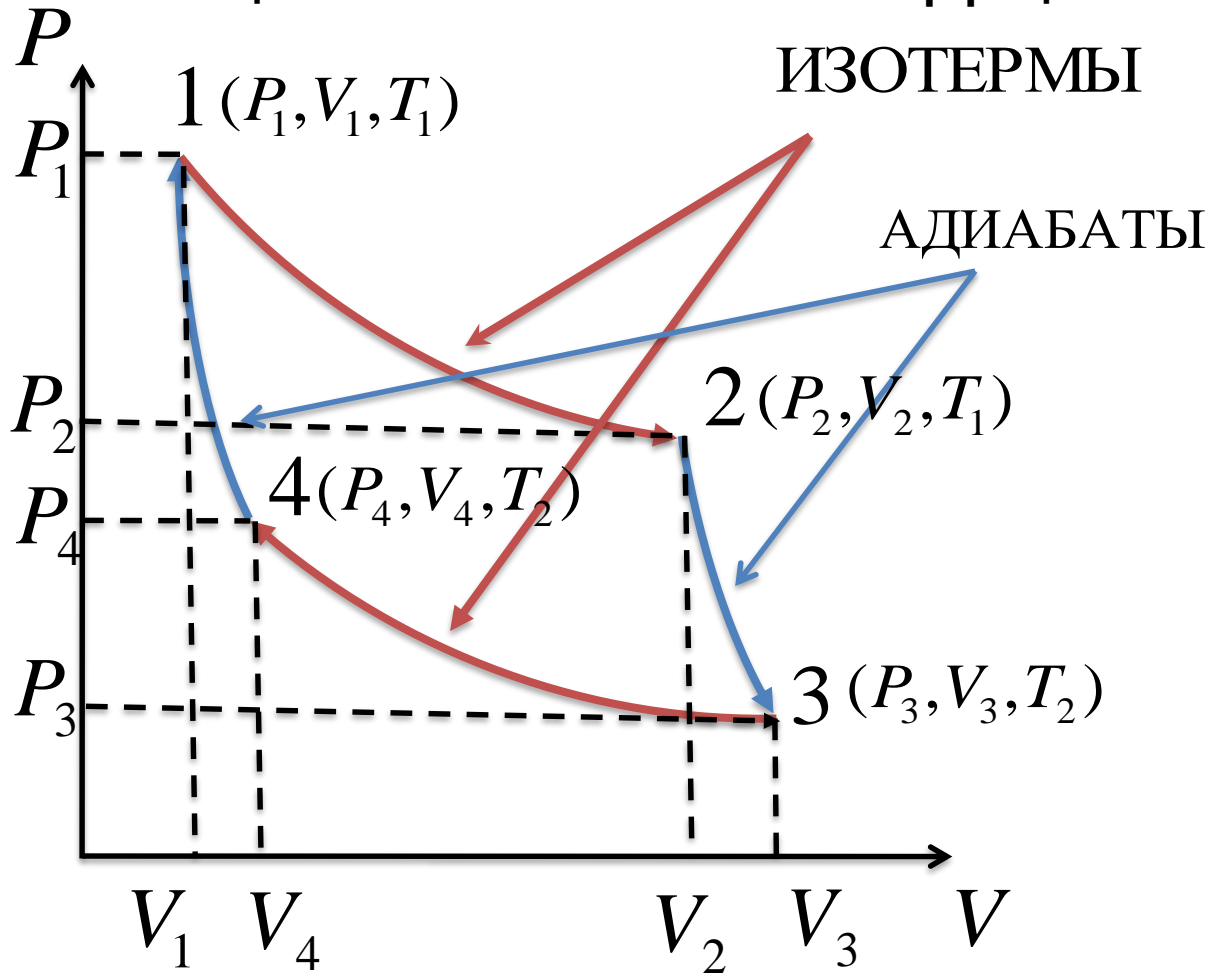
Теорема Карно:

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 .



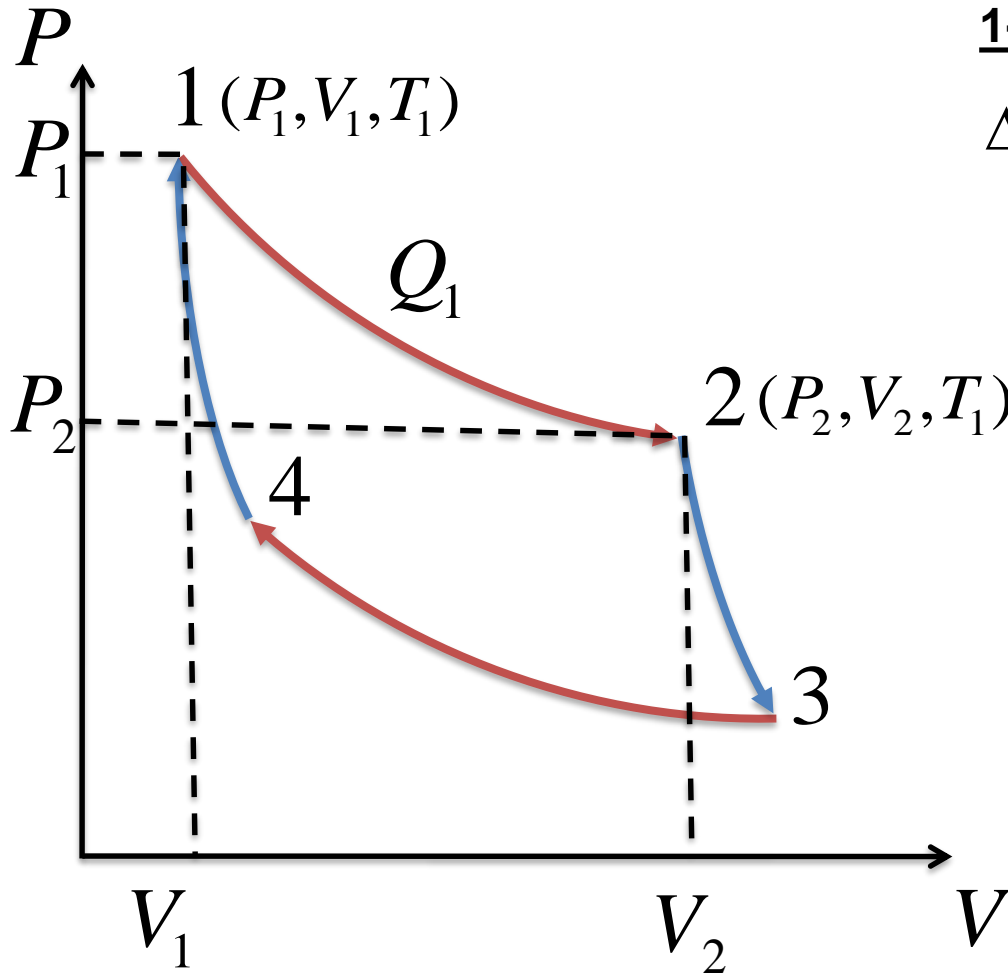
Цикл Карно

Какой цикл имеет наибольший коэффициент полезного действия (КПД)?



Прямой цикл Карно

Цикл Карно



1- \rightarrow 2 изотермическое расширение

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

$$Q_1 = A_1$$

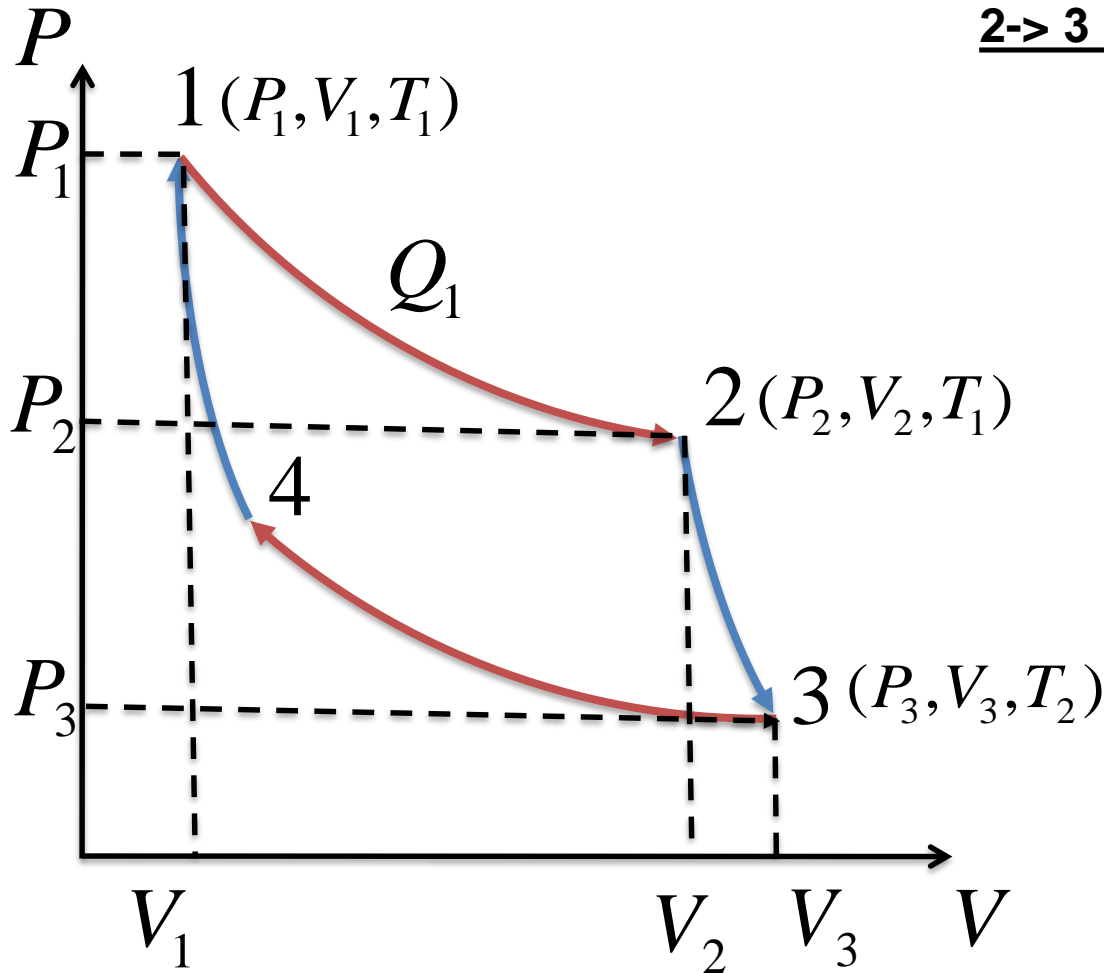
$$A_1 = Q_1 = RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Цикл Карно

2->3 адиабатическое расширение

$$T_2 < T_1$$

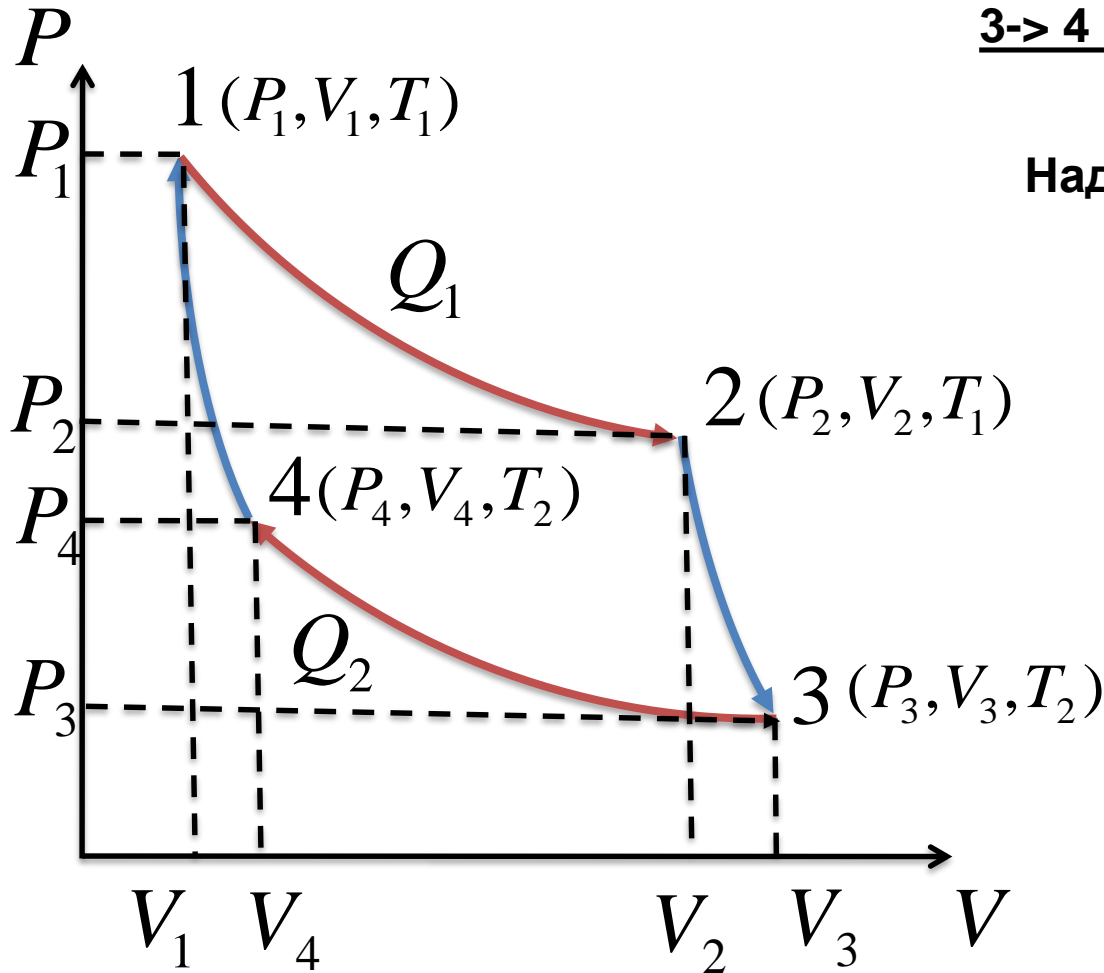
$$\Delta Q = 0$$



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

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

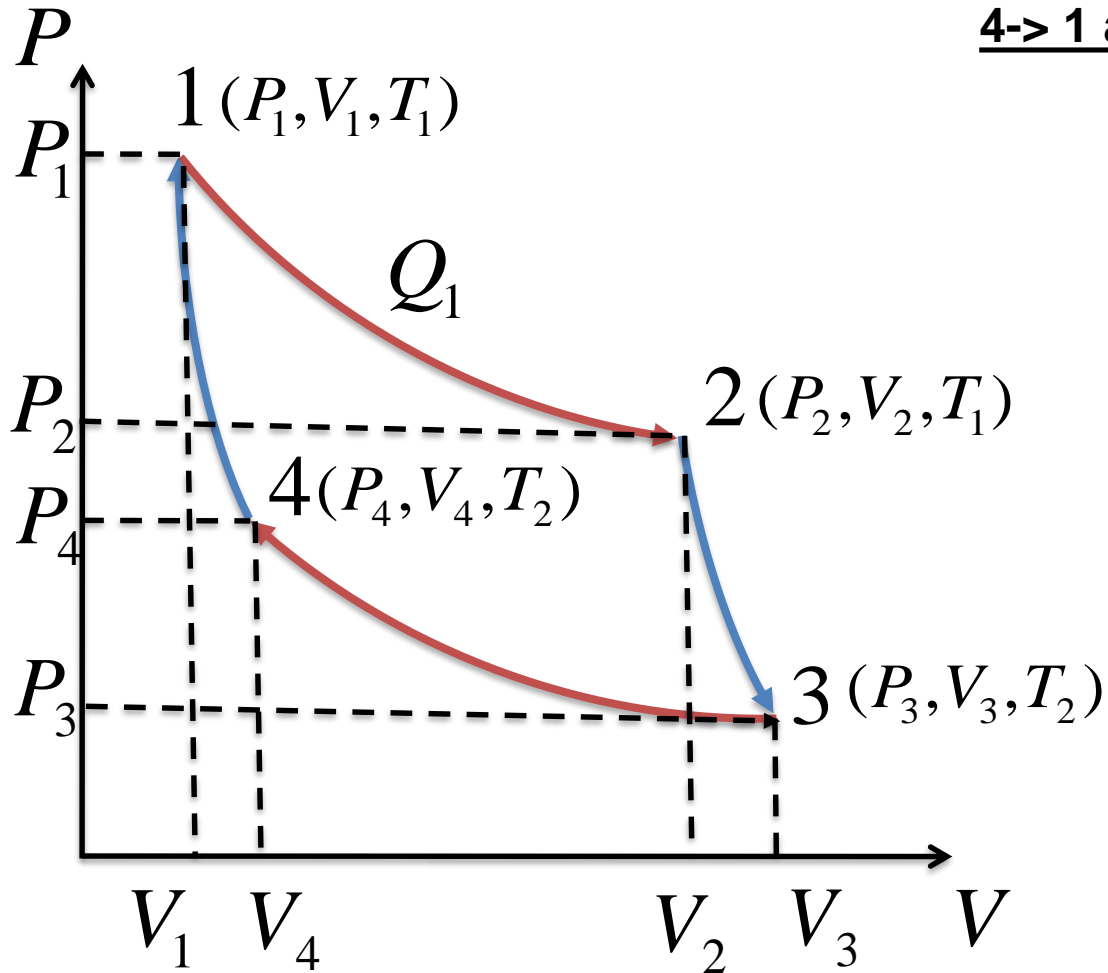
$$A_3 = Q_2 = RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}$$

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.

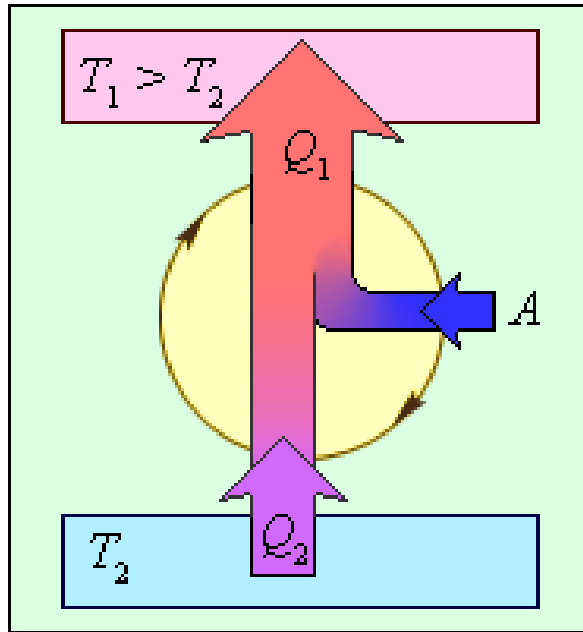
Повышения КПД: повышение температуры нагревателя и понижение температуры тел, выполняющих роль холодильников.

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 ε (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	$C_V = \frac{m}{\mu} \frac{R}{(\gamma - 1)}$ $C_V = \frac{i}{2} R$	$C_P = \frac{m}{\mu} \frac{\gamma R}{(\gamma - 1)}$ $C_P = \frac{m}{\mu} \frac{dQ}{dT}$	$C_T = \pm \infty$	$C_{ад} = 0$