

Некоторые наиболее употребляемые буквы греческого алфавита

$A \alpha$ - альфа	$K \chi$ - каппа	$P \rho$ - ро
$B \beta$ - бета	$H \eta$ - эта	$\Sigma \sigma$ - сигма
$\Gamma \gamma$ - гамма	$\Lambda \lambda$ - ламбда	$\Xi \xi$ - кси
$\Delta \delta$ - дельта	$M \mu$ - ми (мю)	$Z \zeta$ - дзета
$E \varepsilon$ - э псилон	$\Psi \psi$ - пси	$\Theta \theta$ - тета
	$\Phi \phi$ - фи	

ТЕРМОДИНАМИКА

Работа в термодинамике

Работой называется обобщенная форма обмена энергией между системой и окружающей средой, в основе которой лежит изменение внешних параметров системы.

Элементарной работой δA называется работа, совершённая системой в ходе *элементарного* процесса. Элементарная работа определяется формулой

$$\delta A = p \cdot dV$$

где p – давление газа, dV – бесконечно малое изменение объёма системы.

Если газ расширяется, то $dV > 0$. Элементарная работа газа $\delta A > 0$. Газ совершает работу. Если газ сжимается, то $dV < 0$ и $\delta A' < 0$. Над газом совершается работа.

ТЕРМОДИНАМИКА

Работа в термодинамике

dV - бесконечно малое изменение объёма системы. Функция процесса *первого типа*;

δA - элементарная работа, бесконечно малая величина. Функция процесса *второго типа*.

Символ d означает бесконечно малое *изменение*, а символ δ – бесконечно малую *порцию*.

Работа системы в ходе произвольного процесса:

$$A = \int \delta A = \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

Работа над системой:

$$A' = \int \delta A' = - \int \delta A = - \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

ТЕРМОДИНАМИКА

Тепло (теплота) в термодинамике

Пусть a и b - две замкнутые равновесные системы с температурами T_a и T_b . Пусть $T_a > T_b$. Приведем a и b в контакт. Новая замкнутая система ab - не является равновесной. В системе начнётся процесс выравнивания температур. Установится температура T , причем $T > T_b$ и $T < T_a$.

В итоге внутренняя энергия системы a понизится ($\Delta U_a < 0$), а системы b повысится ($\Delta U_b > 0$). Система ab – замкнутая, следовательно

$$\Delta U_b = -\Delta U_a$$

Внутренняя энергия системы b прирастает за счёт убыли внутренней энергии системы a . Системы *обмениваются энергией*. Этот обмен называется **теплообменом**.

ТЕРМОДИНАМИКА

Тепло (теплота) в термодинамике

Энергия, которую получает система при *теплообмене* с окружающей средой, называется **теплом (количеством теплоты)** и обозначается буквой Q .

Если $Q > 0$, то система *получает* энергию из окружающей среды, если $Q < 0$, то система *отдаёт* энергию в окружающую среду.

Тепло Q является *функцией процесса* второго типа. Система в каждом своём состоянии не обладает теплом, у неё есть функция состояния - *внутренняя энергия* U . Система лишь имеет возможность передать тепло.

Работа и теплота – не виды энергии, а формы ее обмена.

ЛЕКЦИЯ 6

Термодинамика

План лекции

1. Первое начало термодинамики.
2. Работа и теплота идеального газа в изопроцессах.
3. Устройство тепловой машины.
4. Коэффициент полезного действия (к.п.д.) тепловой машины.

ТЕРМОДИНАМИКА

Первый принцип (первое начало) термодинамики

Если система получает тепло δQ из окружающей среды, увеличивается внутренняя энергия системы dU . $dU = \delta Q$ при $V = \text{const}$. Если система расширяется, то она совершает работу δA . Тогда δQ идёт на увеличение внутренней энергии dU , и на совершение работы системой.

В каждом элементарном процессе *тепло* δQ , приобретённое системой, расходуется на *увеличение внутренней энергии* системы dU и *работу* δA , совершаемую системой в этом процессе.

$$\delta Q = dU + \delta A$$

ТЕРМОДИНАМИКА

Работа и теплота идеального газа в изопроцессах

1. *Изохорический процесс.* $V = \text{const.}$

$$\delta Q = dU + \delta A$$

Работа: $A = 0$. Тепло: $\delta A = 0 \longrightarrow Q = dU$.

Сообщаемое системе тепло превращается в её внутреннюю энергию.

Внутренняя энергия идеального газа есть средняя суммарная *кинетическая* энергия всех его молекул.



ν - (ню) число молей газа; R – универсальная газовая постоянная.

В изохорном процессе единственным способом изменения внутренней энергии системы является теплообмен.

Тогда из первого начала термодинамики $\delta Q = dU$ следует, что

$$\delta Q = \frac{i}{2} \nu R dT \longrightarrow Q = \int_1^2 \delta Q = \frac{i}{2} \nu R \Delta T$$

Полное тепло, которое получает газ в изохорическом процессе:

$$Q = \int_1^2 \delta Q = \frac{i}{2} \nu R \Delta T$$

ТЕРМОДИНАМИКА

Работа идеального газа при изопроцессах

$$\delta Q = dU + \delta A$$

2. Изобарный процесс. $p = \text{const}$.

Работа. Из определения работы - $A = \int \delta A = \int_{V_1}^{V_2} p dV$

В изобарном процессе $p = \text{const}$, тогда

$$A = p(V_2 - V_1) = p\Delta V$$

При изобарном расширении $\Delta V > 0$, и газ совершает положительную работу, *тратя* на это свою внутреннюю энергию.

При изобарном сжатии $\Delta V < 0$, и работа газа отрицательна, то есть работа совершается внешним объектом над газом, и газ при этом *получает извне* добавку к своей внутренней энергии.

ТЕРМОДИНАМИКА

Работа идеального газа при изопроцессах

$$\delta Q = dU + \delta A$$

2. Изобарный процесс. $P = \text{const}$.

Тепло.

При расширении газ совершает работу. Источник энергии - *внутренняя энергия* газа. Так как расширение идет *при повышении температуры*, внутренняя энергия *увеличивается*, одновременно *расходуясь* на совершение работы. Получаемого тепла хватает на совершение работы и *на увеличение внутренней энергии*. Прирост dU связан с приростом температуры dT :

$$dU = \frac{i}{2} \nu R dT$$

Из первого начала термодинамики порция тепла, вызвавшая этот прирост dU

$$\delta Q = dU + \delta A = \frac{i}{2} \nu R dT + p dV$$

ТЕРМОДИНАМИКА

Работа идеального газа при изопроцессах

2. *Изобарный процесс . $P=const$.*

$$\delta Q = \frac{i}{2} \nu R dT + p dV$$

Увеличение объёма dV и температуры dT в изобарном процессе связаны уравнением состояния $pV = \nu RT$. Дифференцируя, получим

$$p dV = \nu R dT$$

Тогда полученное выше равенство преобразуется к виду:

$$\delta Q = \frac{i}{2} \nu R dT + \nu R dT$$

В изобарном процессе *теплоёмкость* газа *не зависит* от температуры -

$$C_p = \left(\frac{i}{2} + 1 \right) \nu R$$

Полное тепло, которое получает газ в изобарном процессе, равно:

$$Q = \int_1^2 \delta Q = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT = C_p \Delta T = \left(\frac{i}{2} + 1 \right) \nu R \Delta T$$

ТЕРМОДИНАМИКА

$$\delta Q = dU + \delta A$$

Работа идеального газа при изопроцессах

3. Изотермический процесс. $T = \text{const.}$

Работа. Согласно определению

$$A = \int \delta A = \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

Для вычисления интеграла необходимо знать выражение для функции $p(V)$. Из уравнения состояния $pV = \nu RT$ получим

$$p = \nu RT \cdot \frac{1}{V}$$

$$A = \nu RT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V}$$

Итак,

$$A = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

ТЕРМОДИНАМИКА

Работа идеального газа при изопроцессах

$$\delta Q = dU + \delta A$$

3. Изотермический процесс. $T = \text{const.}$

Тепло. Источником работы A , как следует из *первого начала термодинамики*, является внутренняя энергия U и подводимое к газу тепло Q . В изотермическом процессе *внутренняя энергия не меняется* - $dU = 0$. Тогда $\delta Q = \delta A$.

В изотермическом процессе только тепло является источником работы; в работу превращается всё подводимое к газу тепло.

$$Q = A = \nu R T \ln \frac{V_2}{V_1}$$

ТЕРМОДИНАМИКА

Работа идеального газа при изопроцессах

$$\delta Q = dU + \delta A$$

4. Адиабатический процесс.

Работа. Для определения работы требуется вычислить интеграл

$$A = \int \delta A = \int_{V_1}^{V_2} p(V) dV$$

Зависимость $p(V)$ следует из уравнения Пуассона $pV^\gamma = \text{const}$

$$A = \frac{p_1 V_1}{\gamma - 1} \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right)$$

При адиабатном *расширении* работа *положительна* (её совершает газ), при *сжатии* – *отрицательна* (её совершает над газом *внешняя сила*).

ТЕРМОДИНАМИКА

Работа идеального газа при изопроцессах

$$\delta Q = dU + \delta A$$

4. Адиабатический процесс.

Используя уравнение Пуассона, можно связать работу с *относительным изменением давления* в виде p_2/p_1 :

$$A = \frac{p_1 V_1}{\gamma - 1} \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right)$$

Тепло. По определению адиабатического процесса система в этом процессе *не получает и не отдаёт* тепло, так что

$$\delta Q = 0, \quad Q = 0.$$

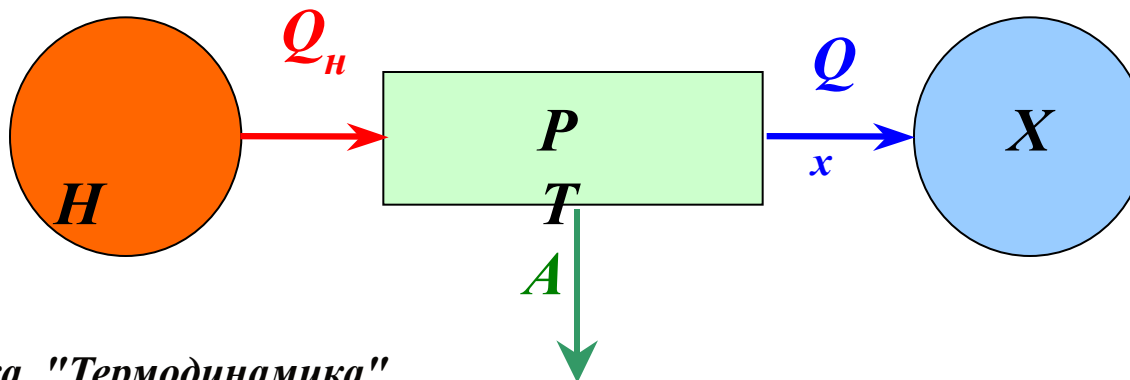
ТЕРМОДИНАМИКА

Устройство тепловой машины

В основе тепловых машин лежат два принципа:

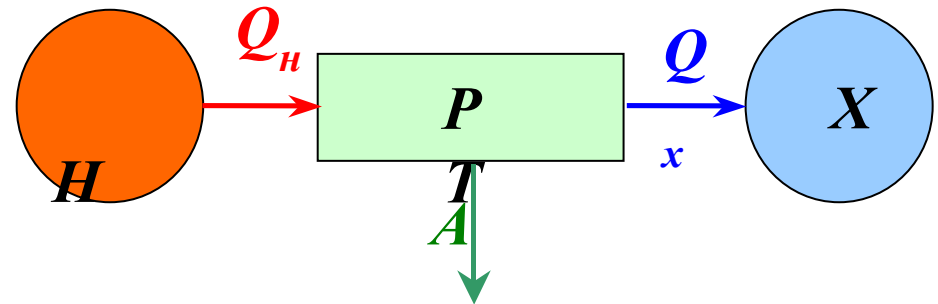
- 1. В машине должно присутствовать тепло, и оно должно превращаться в работу.*
- 2. Тепловая машина должна работать циклически.*

Элементы тепловой машины: **нагреватель H** , **рабочее тело PT** , и **холодильник X** .



ТЕРМОДИНАМИКА

Принцип работы тепловой машины



Рабочее тело, получая тепло от нагревателя, *меняет своё состояние*. Изменяется объём рабочего тела dV , совершается работа. Объём – это *функция состояния*.

В процессе работы тепловой машины возможна лишь одна устойчивая ситуация: состояние рабочего тела *меняется периодически*.

Тогда *графиком процесса*, происходящего с рабочим телом, является в любых координатах **замкнутая** линия, называемая **ЦИКЛОМ**.

КАКИМ должен быть цикл?

Как, в какой последовательности должны меняться в цикле функции состояния рабочего тела – давление, объём, температура и т.д.

ТЕРМОДИНАМИКА

Работа тепловой машины

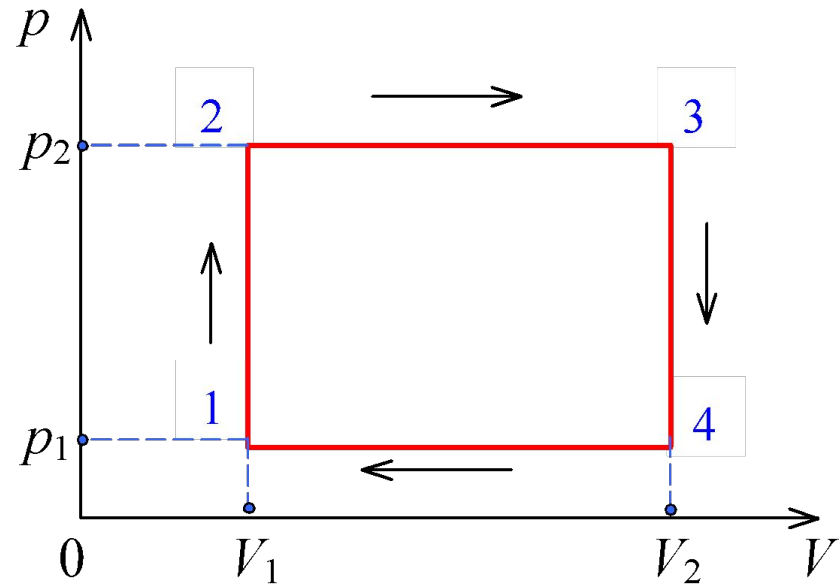
Решение: нарисовать на графике в каких-либо координатах произвольную замкнутую линию, а затем подобрать уравнения, которые её описывают. Например, нарисовать на графике в координатах (p, V) прямоугольник:

Уравнения этого цикла имеют вид:

$$(1 \rightarrow 2): V = V_1; \quad (2 \rightarrow 3): p = p_2; \quad (3 \rightarrow 4): V = V_2; \quad (4 \rightarrow 1): p = p_1.$$

Хороший ли это цикл?

Количественной характеристикой цикла и, значит, тепловой машины, является коэффициент полезного действия (к.п.д.).



ТЕРМОДИНАМИКА

Коэффициент полезного действия (к.п.д.) тепловой машины.

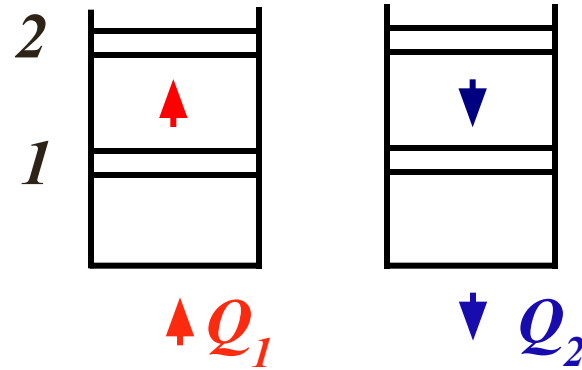
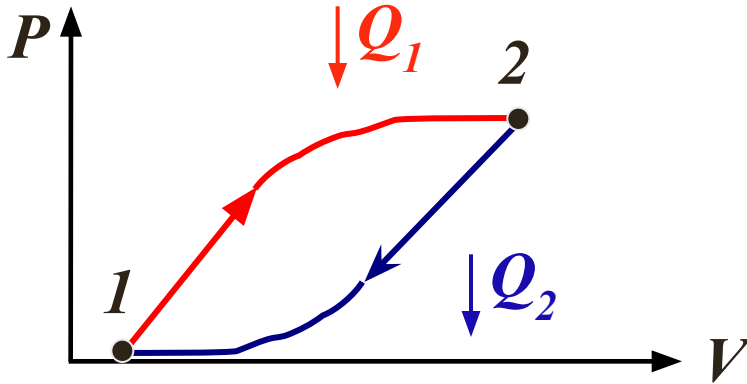
Коэффициентом полезного действия тепловой машины (цикла) называется отношение **работы** A , совершаемой машиной за цикл, к **теплу** Q_H , которое за цикл передаёт нагреватель рабочему телу.

$$\eta = \frac{A}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_x}{Q_H} = 1 - \frac{Q_x}{Q_H}$$

Покажем это на примере простого цикла

ТЕРМОДИНАМИКА

Коэффициент полезного действия (к.п.д.) тепловой машины.



Приведем цилиндр в контакт с тепловым резервуаром – рабочее тело начнет разогреваться и расширяться.

Цилиндр, получив тепло Q_1 и совершив работу A_1 , перейдет в состояние 2. В соответствии с первым началом термодинамики:

$$Q_1 = U_2 - U_1 + A_1$$

Для возврата поршня в состояние 1, необходимо сжать рабочее тело, т.е. затратить работу $-A_2$.

Выигрыш в работе, если $A_2 < A_1$. Следовательно, сжатие следует производить при охлаждении цилиндра:

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

ТЕРМОДИНАМИКА

Коэффициент полезного действия (к.п.д.) тепловой машины.

$$Q_1 - Q_2 = A_1 - A_2$$

В круговом цикле тепловая машина получила от нагревателя тепло Q_1 и отдала холодильнику тепло $-Q_2$. Количество тепла $Q_1 - Q_2$ пошло на совершение полезной работы .

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

Это коэффициент полезного действия (кпд) тепловой машины

Периодически действующая тепловая машина без холодильника, т.е. при $Q_2 = 0$, имела бы кпд 100%, т.е. вся заимствованная теплота превращается в работу. Закон сохранения энергии не нарушается. Вечный двигатель – перпетуум мобиле второго рода.