

План лекции:

1. T-S диаграммы
2. Цикл Карно на T-S диаграмме
3. Эксергия - максимальная полезная работа

1. T-S ДИАГРАММЫ

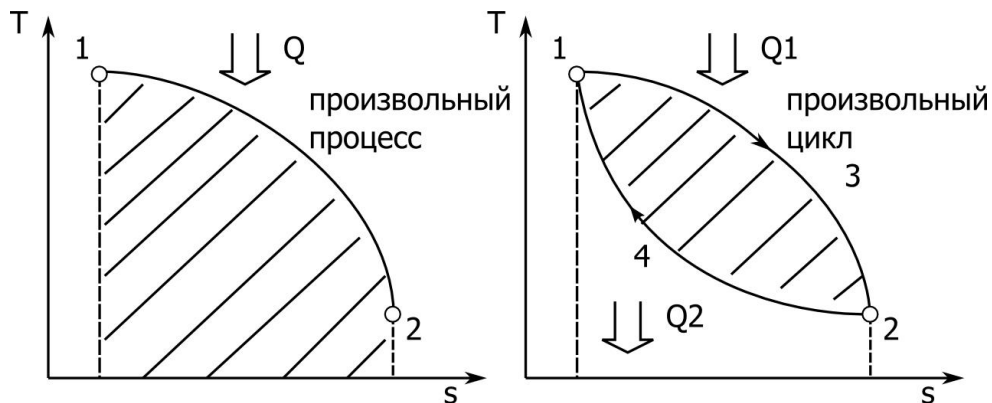
Рассмотренная ранее $p-v$ - диаграмма называется рабочей диаграммой, т.к. работа в термодинамическом процессе на этой диаграмме представляется площадью, ограниченной кривой процесса, крайними ординатами и осью абсцисс.

При изучении термодинамических процессов и циклов большое значение имеет также $T-s$ - диаграмма. На этой диаграмме по оси ординат откладывается температура, а по оси абсцисс – энтропия.

Поскольку $ds = dq / T$:

$$q_{1-2} = \int_1^2 T ds, \quad (1)$$

т.е. на $T-s$ -диаграмме площадь под кривой процесса показывает теплоту, подведённую к рабочему телу или отведённую от него.

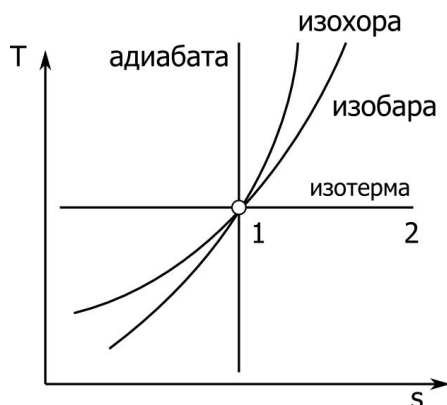


Обратимые термодинамические циклы на $T-s$ -диаграмме изображаются в виде замкнутых контуров. Площадь, ограниченная таким контуром, отражает теплоту, преобразованную в работу в обратимом цикле.

По графическому представлению цикла на $T-s$ -диаграмме можно определить термический КПД цикла как отношение площади ограниченной контуром цикла к площади под кривой процесса подвода теплоты 1-3-2:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}. \quad (2)$$

На рисунке ниже представлен вид основных термодинамических процессов на $T-s$ -диаграмме. За начало процесса принята точка 1 и через неё проведены кривые, представляющие собой различные процессы.



Наиболее просто на $T-s$ -диаграмме представляются изотермический и адиабатный процессы. Так как для обратимого **адиабатного процесса** $s = \text{const}$, то на этой диаграмме он представляется в виде вертикальной прямой. **Изотермический процесс** – прямой параллельной оси энтропии. **Изохорный и изобарный** процессы представляются на $T-s$ -диаграмме кривыми, как это видно из уравнений:

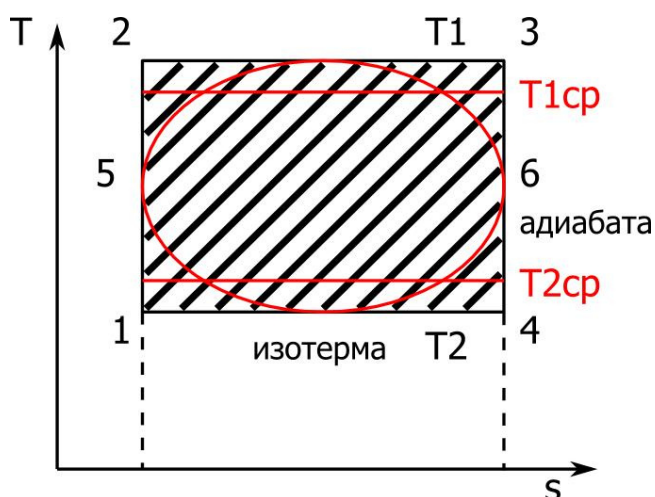
$$\Delta s = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} \quad \Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} . \quad (3)$$

Так как теплоемкости c_p и c_v положительны, то при увеличении значений энтропии в процессе кривые переходят к всё более высоким значениям температуры.

По $T-s$ -диаграмме можно легко анализировать процессы с точки зрения изменения энтропии. В частности видно, что все процессы, идущие с подводом теплоты (справа от адиабаты) приводят к увеличению энтропии, с отводом теплоты к уменьшению. В отличие от $p-v$ -диаграммы, здесь наблюдаемые процессы располагаются в верхней правой и нижней левой четверти.

2. ЦИКЛ КАРНО НА T-S ДИАГРАММЕ

Цикл Карно на $T-s$ -диаграмме представляется в виде прямоугольника ограниченного сверху и снизу прямыми, соответствующими температурам теплоисточника и холодильника.



При исследовании обратимых циклов степень совершенства произвольного цикла определяется тем, насколько термический КПД этого цикла близок к термическому КПД цикла Карно, осуществляемого между крайними температурами рассматриваемого цикла.

КПД произвольного обратимого цикла можно рассчитать, используя $T-s$ -диаграмму следующим образом:

$$\eta = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_{cp2}}{T_{cp1}}, \quad (4)$$

где:

$$T_{cp1} = \frac{\int T ds}{\Delta s} = \frac{5-2-3-6}{\Delta s}, \quad T_{cp2} = \frac{\int T ds}{\Delta s} = \frac{6-4-1-5}{\Delta s}. \quad (5)$$

Если посмотреть на произвольный цикл, вписанный в цикл Карно, то площадь вписанного цикла меньше, чем площадь цикла Карно. Отношение этих площадей называют **коэффициентом заполнения цикла**. Чем больше коэффициент заполнения цикла, тем ближе рассматриваемый цикл к наиболее эффективному преобразованию теплоты в работу. Процесс совершенствования циклов тепловых машин называют **карнотизацией цикла**. Повышение средней температуры подвода теплоты T_{1cp} и понижение средней температуры отвода теплоты T_{2cp} эквивалентно увеличению коэффициента заполнения цикла.

3. ЭКСЕРГИЯ - МАКСИМАЛЬНАЯ ПОЛЕЗНАЯ РАБОТА

Изолированная система может произвести работу только в том случае, если она не находится в состоянии полного термодинамического равновесия. Чтобы изолированная система, единственным видом работы которой может быть работа расширения, могла произвести работу, необходимо, чтобы **давления или температуры различных тел**, входящих в эту систему, не были абсолютно одинаковы.

В системе, состоящей из тел с различными давлениями, **отсутствует механическое равновесие**.

Если в системе имеются тела с различными температурами, в ней **отсутствует термическое (тепловое) равновесие**.

Только неравновесная система способна производить работу. По мере производства работы изолированная система будет приближаться к равновесному состоянию.

Допустим, например, что **изолированная система состоит из окружающей среды, температура и давление которой практически остаются неизменными, и сжатого воздуха**, имеющего ту же температуру, что и окружающая его среда, но более высокое давление. Такая система находится в термически равновесном, но механически неравновесном состоянии. Подобная система может производить работу, например, перемещая поршень в цилиндре до тех пор, пока давление воздуха не снизится до давления окружающей среды, т. е. пока система не придет в механическое равновесие.

Допустим, в системе **имеются два источника теплоты, обладающих различными температурами, и рабочее тело**, то мы имеем дело с термически неравновесной системой, которая может произвести работу, например, путем неоднократного повторения рабочим телом цикла Карно. В результате совершения цикла Карно производится работа, но также определенное количество теплоты передается от источника с более высокой температурой к источнику с более низкой температурой. В результате такого перехода теплоты температура горячего источника будет понижаться, а холодного — повышаться до тех пор, пока система не достигнет термического равновесия. Дальнейшее производство работы станет невозможным.

Если в предыдущем случае теплота от горячего источника передается непосредственно холодному источнику, минуя рабочее тело, то в результате такого процесса система окажется в состоянии термического равновесия, а никакой работы

произведено не будет. Процесс переноса теплоты без совершения работы мы относим к **необратимым процессам**.

Очевидно, что при переходе системы из термически неравновесного состояния в равновесное **максимальная работа** может быть получена в результате неоднократного совершения рабочим телом цикла Карно, состоящего только из полностью обратимых процессов.

Если имеется **механически неравновесная** изолированная система, то и в этом случае **максимальную работу** можно получить только при осуществлении полностью обратимых процессов. Представим себе, что работа производится за счёт движения поршня. Ясно, что при прочих равных условиях полученная работа будет **тем больше, чем меньше трение** между поршнем и стенками цилиндра машины. Трение представляет собой типичный необратимый процесс. Наибольшая работа была бы получена, если бы трение отсутствовало вовсе, т.е. в полностью обратимом процессе.

Из вышеизложенного можно сделать два важных вывода:

1. Изолированная система способна к производству работы только в случае, когда она находится в неравновесном состоянии. После достижения равновесного состояния работоспособность системы оказывается исчерпанной.

2. Для получения наибольшей возможной работы при переходе системы из неравновесного состояния в равновесное необходимо, чтобы все процессы, протекающие в системе, были полностью обратимы.

Определим теперь более четко понятия **полезной работы, максимальной работы и максимальной полезной работы**, которая может быть произведена термодинамической системой.

В неравновесной изолированной системе работа производится при изменении состояния **источника работы**, обозначим эту работу L .

Часть работы L будет затрачиваться на сжатие окружающей среды, поскольку в изолированной системе увеличение объема (расширение) источника работы на величину ΔV может происходить только за счет уменьшения на ту же величину объема окружающей среды. Работу, затрачиваемую на сжатие окружающей среды (против сил давления среды p_0), обозначим L_0 .

Полезной работой будем называть величину: $L^{\text{полез}} = L - L_0$.

Максимальной полезной работой (работоспособностью системы) будем называть работу источника за вычетом работы, затрачиваемой на сжатие окружающей среды, при условии осуществления в системе только обратимых процессов.

$$L_{\text{полез}}^{\text{макс}} = L^{\text{макс}} - L_0 \quad (6)$$

Перейдем теперь к вопросу об определении величины $L_{\text{полез}}^{\text{макс}}$ в изолированной системе. Предположим, что температура и давление окружающей среды - T_0, p_0 неизменны (объем внешней среды намного больше объема источника работы). Обозначим U, V соответственно внутреннюю энергию и объем источника работы в начальном, неравновесном состоянии, а U_0, V_0 - внутреннюю энергию и объем источника работы в конечном, равновесном по отношению к окружающей среде состоянии. Начальные температуру и давление источника работы обозначим T, p , конечные (равные таковым для среды) - T_0, p_0 . Начальную внутреннюю энергию среды обозначим U'_0 , конечную - U''_0 . Суммарная внутренняя энергия системы в начальном, **неравновесном состоянии**:

$$U'_{\text{сист}} = U + U'_0, \quad (7)$$

а в конечном, **равновесном состоянии**:

$$U''_{\text{сист}} = U_0 + U''_0. \quad (8)$$

Так как рассматриваемая система является изолированной ($dQ_{\text{сист}} = 0$), то из уравнения первого закона термодинамики следует, что работа может быть произведена системой только за счет уменьшения ее внутренней энергии:

$$L = U'_{\text{сист}} - U''_{\text{сист}} = (U - U_0) + (U'_0 - U''_0). \quad (9)$$

Однако между источником работы и окружающей средой может существовать теплообмен, и источник работы может совершать работу над средой. Обозначим Q_0 теплоту, переданную источником работы среде (знак минус), а $L_0 = p_0(V_0 - V)$ - работу, совершенную источником работы над средой (знак минус). В соответствии с первым законом термодинамики:

$$U'_0 - U''_0 = -Q_0 - p_0(V_0 - V). \quad (10)$$

Согласно определению энтропии – теплота **переданная источником работы окружающей среде**, независимо от того являются ли процессы, совершаемые в изолированной системе, обратимыми или нет, равна:

$$Q_0 = T_0(S''_0 - S'_0). \quad (11)$$

В итоге выражение для **полезной работы** можно переписать в виде:

$$\boxed{L_{\text{полез}} = (U - U_0) - T_0(S''_0 - S'_0) - p_0(V_0 - V)}. \quad (12)$$

Уравнение (12) дает значение **полезной работы**, произведенной изолированной системой при переходе из неравновесного состояния в равновесное. Однако уравнение (12) не дает еще значения **максимальной полезной работы**, так как не обуславливает обязательной обратимости всех протекающих в системе процессов.

Для того чтобы найти **максимальную полезную работу** (работоспособность) изолированной системы, необходимо воспользоваться положением о том, что в результате протекания обратимых процессов энтропия изолированной системы не изменяется. Отсюда следует, что если энтропия источника работы уменьшилась на $S - S_0$, то энтропия среды должна возрасти на то же значение, т.е. для обратимых процессов:

$$S - S_0 = S''_0 - S'_0. \quad (13)$$

Тогда, максимальная полезная работа может быть рассчитана следующим образом:

$$\boxed{L_{\text{полез}}^{\text{макс}} = (U - U_0) - T_0(S - S_0) - p_0(V_0 - V)}. \quad (14)$$

Как видно из этого соотношения, максимальная полезная работа системы однозначно определяется начальными параметрами источника работы и параметрами окружающей среды.

Максимальную полезную работу (работоспособность системы) в современной термодинамике принято называть **эксергией**.

$$\boxed{E_v = (U - U_0) - T_0(S - S_0) - p_0(V_0 - V)}. \quad (15)$$