Лекции по термодинамике
доцент каф. Э6, ктн Рыжков С.В.

Лекция №11
ФУНКЦИИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

1. Работоспособность системы

Полезная работа, которая может быть использована, равна разности работы расширения (деформации) системы и работы, затрачиваемой системой при расширении на вытеснение объема окружающей среды:

$$L_{\text{П}} = L_m - L = \int p\mathrm{d}V - L_m$$

Работа вытеснения выражается уравнением

$$L_m = \int \mathrm{d}(p'V)$$

где p' — давление вытесняемой среды.

В термодинамике обычно рассматривают два вида систем: закрытую и открытую со стационарным потоком. В открытой системе со стационарным потоком имеет место равенство давлений в системе (элемент потока) и окружающей среде, и для нее полезная работа представляется в виде располагаемой работы:

$$L_{\text{П}} = L_{\text{O}} = \int p\mathrm{d}V - \int \mathrm{d}(pV) = -\int V\mathrm{d}p.$$

$$L_{\text{П}} = \int p\mathrm{d}V - \int \mathrm{d}(p_o V) = \int (p - p_o)\mathrm{d}V - \int V\mathrm{d}p$$

В закрытой системе при давлении окружающей среды p_o, принятом постоянным, полезная работа выражается уравнением

$$L_{\text{П}} = \int p\mathrm{d}V - \int \mathrm{d}(p_0 V) = \int (p - p_0)\mathrm{d}V = \int (1 - {}^{p_o}/_{p})p\mathrm{d}V.$$

Для этих двух систем могут быть получены функции работоспособности массы.

Так как большинство теплотехнических установок работает в условиях непрерывного потока среды через них, то практическое применение получила только функция работоспособности массы при использовании ее в системе со стационарным потоком. Эта функция получила название ***эксергии*. Если в процессе перехода системы в состояние равновесия с окружающей средой к ней подводится теплота от каких-либо источников, кроме окружающей среды, то в таком случае необходимо учитывать работоспособность подводимой теплоты, которую часто называют ***эксергией теплоты.***

Впервые функции работоспособности были исследованы Н. Гюи и А. Стодолой в конце XIX столетия. Однако развитие техники того времени еще не требовало разработки термодинамического аппарата, основанного на этих функциях. Только в 30-е годы XX столетия эти работы получили дальнейшее развитие в трудах Ф. Бошняковича, Д. Кинана и др.

2. Функции работоспособности. Эксергия

Выражение для функции работоспособности массы, определяющей максимальную полезную работу, которая может быть произведена системой при переходе ее из исходного состояния *A* в состояние равновесия *O* с окружающей средой, может быть получено на основе применения уравнения первого закона термодинамики к процессу перехода. Принятый для оценки работоспособности системы процесс *A*—*a*—*O* перехода ее в состояние равновесия с окружающей средой представлен на *Vp*-диаграмме состояния (рис.1).

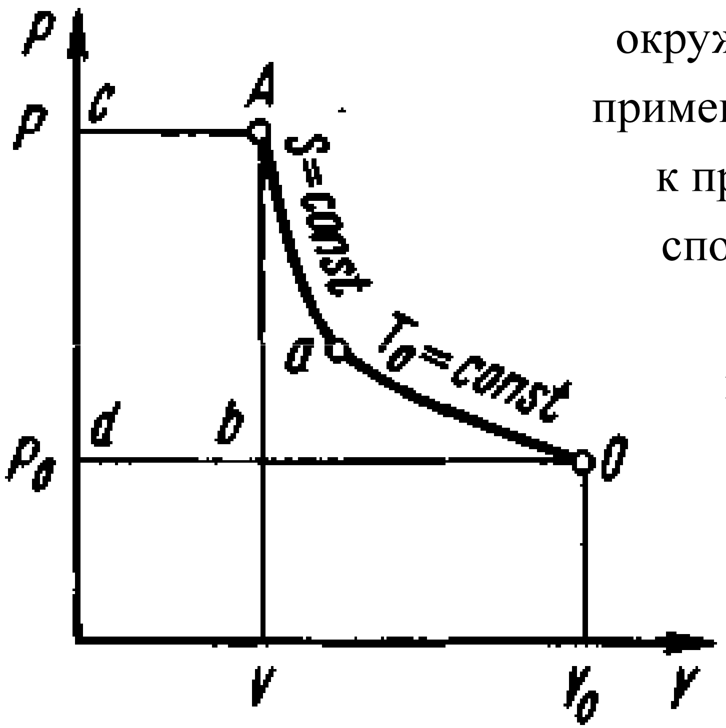

Рис.1. К определению функции работоспособности.

Функция работоспособности массы в системе со стационарным потоком (эксергия). Уравнение первого закона термодинамики для такой системы имеет вид

$$\Delta H = Q - L_0 \qquad (1)$$

где $\Delta H = H_2 - H_1$ - изменение энтальпии системы; $Q = \int T\mathrm{d}S$ - подведенная к системе теплота; $L_0 = -\int V\mathrm{d}p$ - располагаемая работа.

Для процесса $A — a — O$

$$H_0 - H = T_0(S_0 - S) - L_0^{\max}$$

Индекс «max» подчеркивает обратимость процесса перехода. Отсюда

$$L_0^{\max} = (H - H_0) - T_0(S - S_0). .$$

При принятых условиях (определен характер процесса и конечное состояние системы) $L_0^{\max}$ является функцией состояния. . Эта функция работоспособности массы в системе со стационарным потоком называется эксергией и обозначается буквой *Э :*

$$Э = (H - H_0) - T_0(S - S_0). \qquad (2)$$

Эксергия представляет собой максимальную располагаемую работу, которую можно получить от поточной системы в обратимом процессе перехода ее из исходного состояния в состояние равновесия с окружающей средой, имеющей постоянные температуру T_0 и давление p_0 при отсутствии источников теплоты, кроме окружающей среды.

Изменение эксергии при переходе системы из одного состояния в другое

$$\Delta Э = \Delta H - T_0 \Delta S$$

а дифференциал ее

$$d\,Э = d\,H - T_0\, d\,S. \qquad (3)$$

Функция работоспособности массы в закрытой системе. Для закрытой системы уравнение первого закона термодинамики имеет вид

$$\Delta U = Q - L, \qquad (4)$$

где $\Delta U = U_2 - U_1$ — изменение внутренней энергии системы; Q - подведенная к системе теплота; $\mathrm{L} = \int p\mathrm{dV}$ - работа деформации. Уравнение (4) можно переписать в виде

$$\Delta U = Q - L_\Pi - L_m$$

где $L_m = \int \mathrm{d}(p_0\mathrm{V}) = p_0\Delta\mathrm{V}$ — работа вытеснения объема окружающей среды, имеющей постоянное давление;

$L_\Pi = L - L_m = \int p\mathrm{dV} - \int p_0\mathrm{dV} = \int(p - p_0)\,\mathrm{dV}$ - полезная работа.

Для процесса А — а — О это уравнение можно представить в виде

$$U_0 - U = T_0\,(S_0 - S) - L_\mathrm{n}^{\max} - p_0\,(V_0 - V).$$

$$E = (U - U_0) - T_0(S - S_0) + p_0(V - V_0). \qquad (5)$$

Функция работоспособности массы в закрытой системе представляет собой максимальную полезную работу, которая может быть получена от закрытой системы в обратимом процессе перехода ее из исходного состояния в состояние равновесия с окружающей средой при постоянных температуре T_0 и давлении p_0 и отсутствии источников теплоты, кроме окружающей среды. В соответствии с уравнением

$$E = L_n^{\max} = \int (p - p_0)\mathrm{d}V$$

функция работоспособности E представляется площадью AbO на Vp-диаграмме (см. рис.1). Изменение функции E при переходе системы из одного состояния в другое

$$\Delta E = \Delta U - T_0\,\Delta S + p_0 \Delta V, \qquad (6)$$

а дифференциал ее

$$\mathrm{d}E = \mathrm{d}U - T_0 \mathrm{d}S + p_0 \mathrm{d}V.$$

Связь между функциями Э и *E*. Вычитая из уравнения (2) уравнение (5), получаем

$$Э - E = V(p - p_0) = L_{\text{НАС}}.$$

Это уравнение определяет работу насоса $L_{\text{НАС}}$, необходимую для повышения давления в системе от p_0 до p при постоянном объеме. Работа насоса представляется на Vp-диаграмме площадью $cAbd$ (см. рис.1).

Определение эксергии на *SH*-диаграмме. Эксергия массы, как любая функция состояния, может быть определена аналитически с помощью уравнения состояния вещества или графически с помощью диаграмм состояния. Первый путь оказывается целесообразным только для идеального газа, имеющего простое уравнение состояния. Эксергию реальных веществ проще определять с помощью диаграмм состояния, из которых наиболее широкое распространение получила *SH*-диаграмма. Для определения эксергии массы на *SH*-диаграмме (рис. 2) необходимо провести линию с нулевой эксергией (*Э = 0*) через точку температуры и давления окружающей среды (T_0, p_0) — так называемую *прямую окружающей среды*, для которой из уравнение (3) можно записать

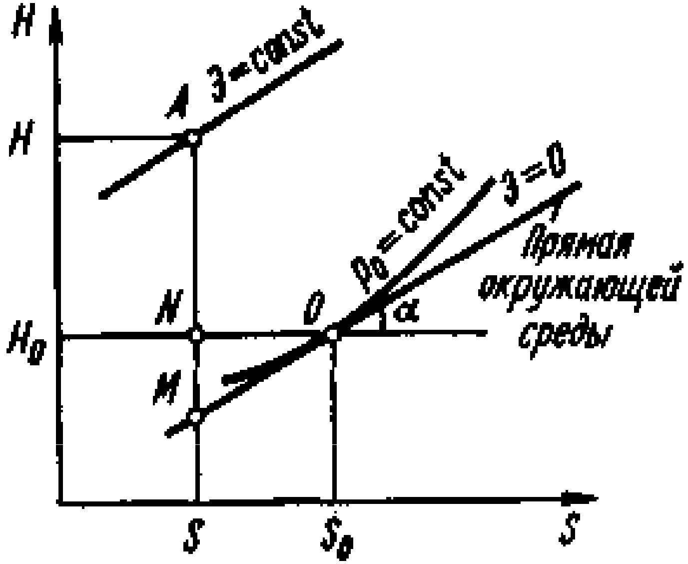

Рис. 2. К определению эксергии на SH-диаграмме.

$$tg\,\alpha = \left(\frac{\partial H}{\partial S}\right)_{Э=0} = T_0$$

где α — угол наклона прямой окружающей среды к оси абсцисс (линия прямая, так как T_0 = const).

Прямая окружающей среды касательна к изобаре p_0 = const, так как из основного уравнения термодинамики следует $\mathrm{d}H = T\mathrm{d}S + V\mathrm{d}p$

$$\left(\frac{\partial H}{\partial S}\right)_p = T,$$ а в точке $O(T_o,p_o)$ $$\left(\frac{\partial H}{\partial S}\right)_{p_o} = T_o$$

Эксергия массы может быть представлена на *SH*-диаграмме с помощью прямой окружающей среды в виде

$$Э = H - H_0 - T_0(S - S_0) = AN - \mathrm{tg}\,\alpha \bullet ON = AN \pm MN,$$

где знак перед *MN* определяется знаком разности $(S — S_0)$. Отсюда

$Э = AM = H — H_м$. Таким образом, для определения эксергии на *SH*-диаграмме необходимо провести линию S = const через точку *A*, характеризующую состояние системы, до пересечения с прямой окружающей среды. Эксергия равна разности энтальпий в этих точках, а функция

$$E = Э — V(p — p_0)$$

3. Работоспособность теплоты

Превращение подведенной к системе теплоты в работу может быть осуществлено при совершении системой цикла, что связано с необходимостью отвода теплоты от системы. При определении выражения для работоспособности теплоты полагаем, что отвод теплоты Q_0 происходит при температуре окружающей среды T_0 = const (рис.3). Отсюда работоспособность теплоты Q, подведенной к системе в процессе *1 — 2*, выражается площадью *12341* цикла на *ST*-диаграмме и может быть представлена в виде

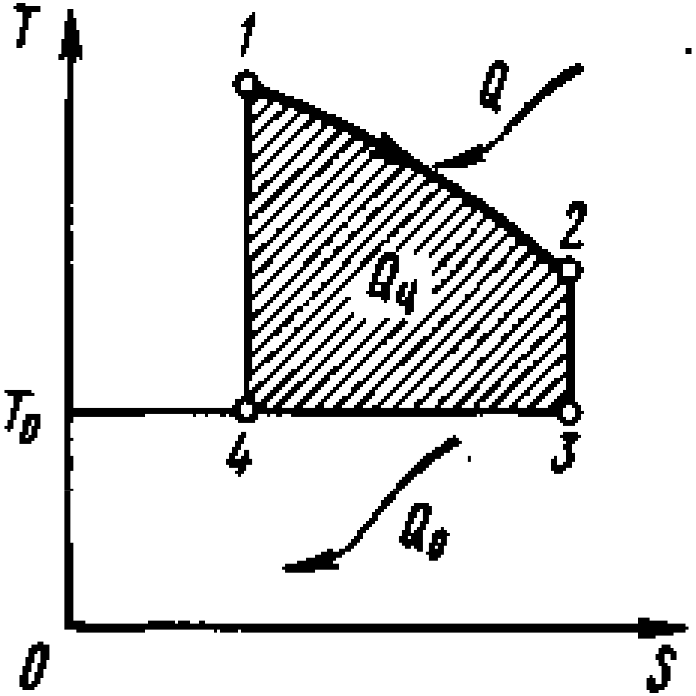

Рис. 3. К определению эксергии теплоты.

$$Э_Q = L_Ц = Q_Ц = Q - Q_0 = \int TdS - \int T_0 dS,$$

или

$$Э_Q = \int (1 - T_0 / T)\delta Q \qquad (7)$$

4. Уравнения, определяющие работоспособность системы

Запишем уравнение первого закона термодинамики с помощью характеристик работоспособности. Выражая $\mathrm{d}H$ из уравнения (3) и подставляя в уравнение (1), получаем

$$\mathrm{d}Э + T_0\,\mathrm{d}S = \delta Q - \delta L_{о}^{max}.$$

Имея в виду уравнение и учитывая выражение (7), запишем уравнение первого закона термодинамики для поточной системы:

$$\mathrm{d}Э = \delta Э_Q - \delta L_{о}^{max}. \tag{8}$$

$$L_0^{мах} = -\Delta Э + \delta Э_Q \tag{9}$$

Аналогичным образом, выражая $\mathrm{d}U$ из уравнения (6) и подставляя в уравнение (4), находим

$$\mathrm{d}E + T_0 dS - p_0\,\mathrm{d}V = \delta Q - \delta L_{П}^{max}$$

Имея в виду, что $\delta Q = T\mathrm{d}S$, $\delta \mathrm{L}^{max} = p\mathrm{d}V$, учитывая уравнение (7) и вводя обозначение максимальной полезной работы, уравнение первого закона термодинамики для закрытой системы можно представить в виде

$$\mathrm{d}E = \delta Э_Q - \delta L_{П}^{мах}.$$

Отсюда работоспособность закрытой системы при переходе ее из одного состояния в другое в произвольном процессе

$$L_{П}^{max} = -\Delta E + Э_Q. \tag{10}$$

Для системы со стационарным потоком это выражение имеет вид

$$L_0 = -\Delta Э + Э_Q - L_{\text{Н}}, \tag{11}$$

для закрытой системы

$$L_{\text{П}} = -\Delta E + Э_Q - L_{\text{Н}}.$$

Полученные уравнения позволяют определить потери работы вследствие необратимости $L_{\text{Н}}$, зная работу L, производимую системой в необратимом процессе, либо, наоборот, зная потери $L_{\text{Н}}$ из-за необратимости, вычислить работу L, которую может при этом совершить система.

5. Эксергетический КПД

Относя работу L_0, полученную от системы со стационарным потоком в необратимом процессе, к работоспособности системы $L_0^{\text{мах}}$, можно определить выражение для эксергетического КПД, учитывающего потери из-за необратимости процесса:

$$\eta_э = \frac{L_o}{L_o^{\max}} = \frac{L_o}{-\Delta Э + Э_Q} = 1 - \frac{L_H}{-\Delta Э + Э_Q} \qquad (12)$$

Если в рассматриваемой установке вместе с совершением работы имеет место полезное увеличение эксергии некоторого вещества, то

$$\eta_Э = \frac{L_o + \Delta Э'}{-\Delta Э + Э_Q} \qquad (13)$$

где $\Delta Э'$ — полезное увеличение эксергии вещества.

Эксергетический анализ необходим для установок, в которых:

1) получается вещество (рабочее тело), энергия которого используется для получения работы в последующих установках, т.е. когда повышение эксергетического КПД, не увеличивая энергетического КПД, способствует возрастанию T и p рабочего тела и, следовательно, его работоспособности (например, котел);

2) энергия рабочего тела превращается в работу, т.е. увеличение эксергетического КПД одновременно повышает энергетический КПД (например, турбина);

3) потребляется работа, т.е. при увеличении эксергетического КПД также повышается энергетический КПД (например, холодильная машина).

Эксергетический анализ, давая возможность оценить потери, связанные с необратимостью процессов, может способствовать увеличению КПД установок, связанных с совершением работы или потреблением ее. Поэтому для всесторонней и правильной оценки процессов в такого рода установках и определения путей их совершенствования энергетический анализ нужно дополнять эксергетическим. Действительно, в необратимом адиабатном процессе эксергия теплоты равна нулю, а эксергетический КПД выражается отношением располагаемой работы, определяемой уменьшением энтальпии $(L_0 = -\Delta H)$, к уменьшению эксергии рабочего тела $(-\Delta Э)$:

$$\eta_Э = {\Delta H}/{\Delta Э}$$

В необратимом изобарном процессе эксергия теплоты равна изменению эксергии массы вещества, участвующего в теплообмене, т.е. $Э_Q = \Delta Э$. Это следует из уравнения (8), если учесть,что при $p = \mathrm{const}$ $L_0^{\text{мах}} = -\int V dp = 0$. Поэтому Эксергетический КПД теплообменника, например, определяется отношением увеличения эксергии $\Delta Э''$ потока, воспринимающего теплоту, к уменьшению эксергии $\Delta Э'$ потока, отдающего теплоту:

$$\eta_Э = \frac{\Delta Э''}{-\Delta Э'}$$

Контрольные вопросы

- Работоспособность системы
- Эксергия
- Эксергия теплоты
- Функция работоспособности массы в системе со стационарным потоком (эксергия)
- Функция работоспособности массы в закрытой системе
- Связь между функциями Э и Е
- Работоспособность теплоты
- Уравнения, определяющие работоспособность системы