



Термодинамика



Список литературы

Теплотехника. Учебник для ВУЗов. / Под ред. А.П. Баскакова . М., Энергоатомиздат. 1991. – 224 с.

Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергоиздат. – 1987. – 416 с.

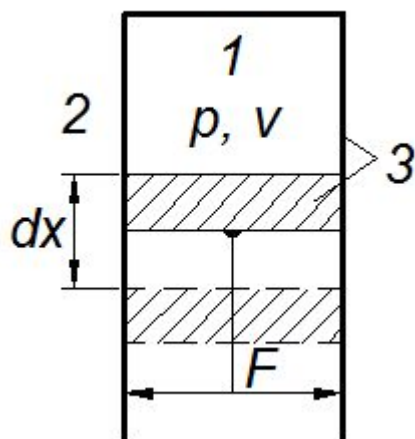
Основные понятия термодинамики

Техническая термодинамика *изучает закономерности взаимного превращения тепловой и механической энергии и свойства тел, участвующих в этих превращениях.* Вместе с теорией теплообмена она является теоретическим фундаментом теплотехники. На ее основе осуществляется расчет и проектирование всех тепловых двигателей, а также всевозможного технологического оборудования.

Термодинамическая система

Термодинамическая система представляет собой совокупность материальных тел, находящихся в механическом и тепловом взаимодействиях друг с другом и с окружающими систему внешними телами («окружающей средой»).

Выбор системы диктуется условиями решаемой задачи. Тела, не входящие в систему, называют **окружающей средой**. Систему отделяют от окружающей среды контрольной поверхностью (для простейшей системы – газа, заключенного в цилиндре под поршнем контрольными поверхностями служат стенки цилиндра и поршень, а окружающей средой называется все, что находится снаружи.)



Газ, находящийся в цилиндре под поршнем
1 – термодинамическая система (рабочее тело);
2 – окружающая среда;
3 – контрольная поверхность

Механическая работа производится при перемещении поршня и сопровождается изменением объема системы. Тепловое взаимодействие заключается в переходе теплоты между системой и окружающей средой. В рассматриваемом примере теплота может подводиться к газу через стенки цилиндра. Простейшей термодинамической системой является рабочее тело

ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ

Свойства каждой системы характеризуются рядом величин, которые принято называть **термодинамическими параметрами**. Рассмотрим некоторые из них, используя при этом известные из курса физики молекулярно-кинетические представления об идеальном газе как о совокупности молекул, которые имеют исчезающе малые размеры, находятся в беспорядочном тепловом движении и взаимодействуют друг с другом лишь при соударениях.

Основных параметров три:

Давление

Температура

Удельный объем

ДАВЛЕНИЕ

Давление обусловлено взаимодействием молекул рабочего тела с поверхностью и численно равно силе, действующей на единицу площади поверхности тела по нормали к последней

В Международной системе единиц (СИ) давление выражается в паскалях
 $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$. Удобнее использовать $1 \text{ кПа} = 1000 \text{ Па}$
и $1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$

До введения системы СИ давление измеряли в технических атмосферах

$$1 \text{ ат} \approx 0,1 \text{ МПа}$$

$$1 \text{ бар} = 0,1 \text{ МПа}$$

Жидкостные манометры чаще всего дают давление в мм ртутного или водяного столба

$$1 \text{ мм вод. ст.} = 9,80665 \text{ Па};$$

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 133,32 \text{ Па}$$

$$1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2$$

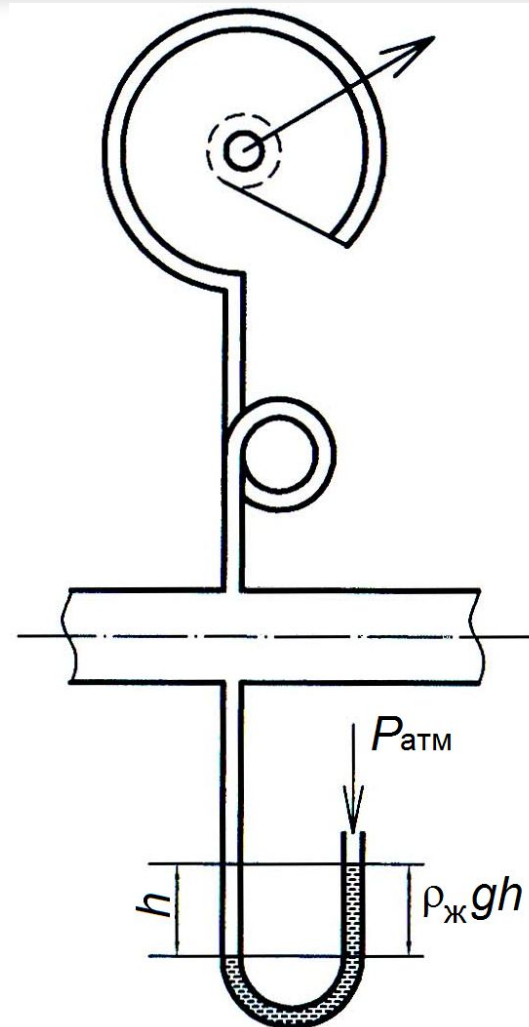
Соотношение между единицами измерения давления

ЕДИНИЦЫ ДАВЛЕНИЯ	Па	бар	ат	ММ.РТ.СТ	ММ.ВОД.СТ
Па	1	0,00001	$1,02 \cdot 10^{-5}$	0,0075	$1,02 \cdot 10^{-1}$
бар	10^5	1	1,02	750	10,2
ат	98100	0,981	1	735,5	10
ММ.РТ.СТ	133,22	0,00133	0,00136	1	0,0136
ММ.ВОД.СТ	9810	0,0981	0,1	73,556	1

Измерение давления

Давление измеряется при помощи манометров, барометров и вакуумметров. Жидкостные и пружинные манометры измеряют избыточное давление, представляющее собой разность между полным или абсолютным давлением p измеряемой среды и атмосферным давлением $p_{\text{атм}}$. Термодинамическим параметром состояния является абсолютное давление

$$P_{\text{изб}} = P - P_{\text{атм}}$$



Температура


Температурой **называется физическая величина, характеризующая степень нагретости тела**. Если две системы находятся в тепловом контакте, то в случае неравенства их температур они будут обмениваться теплотой друг с другом, если же их температуры равны, то теплообмена не будет

В системе СИ единицей температуры является **кельвин (K)**; на практике широко применяется градус Цельсия, другими словами, **стоградусной шкалы (°C)**.

Соотношение между абсолютной температурой T и стоградусной t имеет вид

$$T(K) = t(^{\circ}C) + 273,15$$

Температуру измеряют с помощью жидкостных **термометров, пирометров, тепловизоров, термопар** и других приборов



УДЕЛЬНЫЙ ОБЪЕМ V – ЭТО ОБЪЕМ ЕДИНИЦЫ МАССЫ ВЕЩЕСТВА. Если однородное тело массой M занимает объем V , то по определению $v=V/M$.

В системе СИ единица удельного объема $1 \text{ м}^3/\text{кг}$. Между удельным объемом вещества и его плотностью существует очевидное соотношение: $v=1/\rho$.

Для сравнения величин, характеризующих системы в одинаковых состояниях, вводится понятие **«нормальные физические условия»**: $p = 760 \text{ мм. рт. ст} = 101,325 \text{ кПа}$; $T = 273,15 \text{ К}$.

В разных отраслях техники и разных странах вводят свои, несколько отличные от приведенных «нормальные условия», например, «технические» ($p = 735,6 \text{ мм. рт. ст} = 98 \text{ кПа}$, $t = 15 \text{ °C}$) или нормальные условия для оценки производительности компрессоров ($p = 101,325 \text{ кПа}$, $t = 20 \text{ °C}$) и т. д. В дальнейшем будут использоваться нормальные физические условия

Уравнение состояния

Основные параметры: удельный объем, температура и давление простейших систем, которыми являются газы, пары или жидкости, связаны термическим уравнением состояния вида $f(p, v, T)=0$.

Конкретный вид уравнения состояния зависит от индивидуальных свойств вещества

Уравнение Клапейрона (1834 г.) $pV = MRT$
где V – объем, занимаемый массой M идеального газа.
Величину R , Дж/(кг · К), называют удельной газовой постоянной (т.е. отнесенной на 1 кг газа). Поделив левую и правую части уравнения на M , получим

$$pv = RT$$

Газовая постоянная

В соответствии с законом Авогадро (1811 г.) объем 1 моля, одинаковый в одних и тех же условиях для всех идеальных газов, при нормальных физических условиях равен $22,4136 \text{ м}^3$

$$\begin{aligned}\mu R &= pV_{\mu}/T = 101,325 \cdot 22,4136/273,15 = \\ &= 8,314 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})\end{aligned}$$

Уравнению Клапейрона можно придать универсальную форму, если отнести газовую постоянную к 1 молю газа, т. е. к количеству газа, масса которого в килограммах численно равна молекулярной массе μ . Если) $M = \mu$ и $V = V_{\mu}$, получим для одного моля уравнение Клапейрона – Менделеева

$$pV_{\mu} = \mu RT$$

Термодинамический процесс

Изменение состояния термодинамической системы во времени называется **термодинамическим процессом**. Так, при перемещении поршня в цилиндре объем, а с ним давление и температура находящегося внутри газа будут изменяться, будет совершаться процесс расширения или сжатия газа

Основные термодинамические процессы:

- Изобарный**
- Изохорный**
- Изотермический**
- Адиабатный**
- Полиτροпный**

Внутренняя энергия

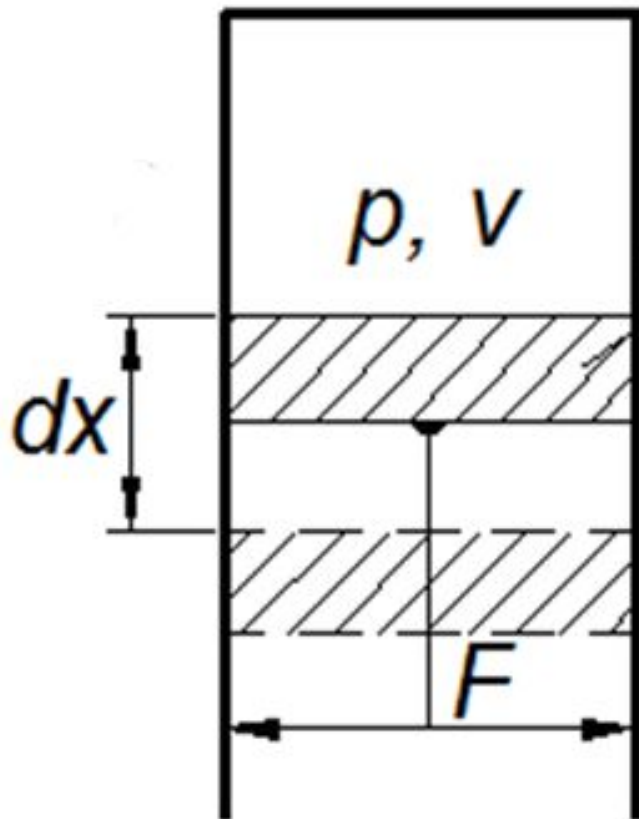
ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ U , ДЖ

В дальнейшем *под* внутренней энергией *будем понимать* энергию хаотического движения молекул, внутримолекулярную энергию и потенциальную энергию сил взаимодействия между молекулами.

Кинетическая энергия молекул является функцией температуры, значение потенциальной энергии зависит от среднего расстояния между молекулами и, следовательно, от занимаемого газом объема V , т. е. является функцией V . Следовательно, *внутренняя энергия U есть функция состояния тела*, т.е. зависит только от его параметров.

Величина $u = U / M$, называется удельной внутренней энергией (Дж/кг), представляет собой внутреннюю энергию единицы массы вещества

Работа расширения



Механическая работа равна произведению силы на путь ее действия

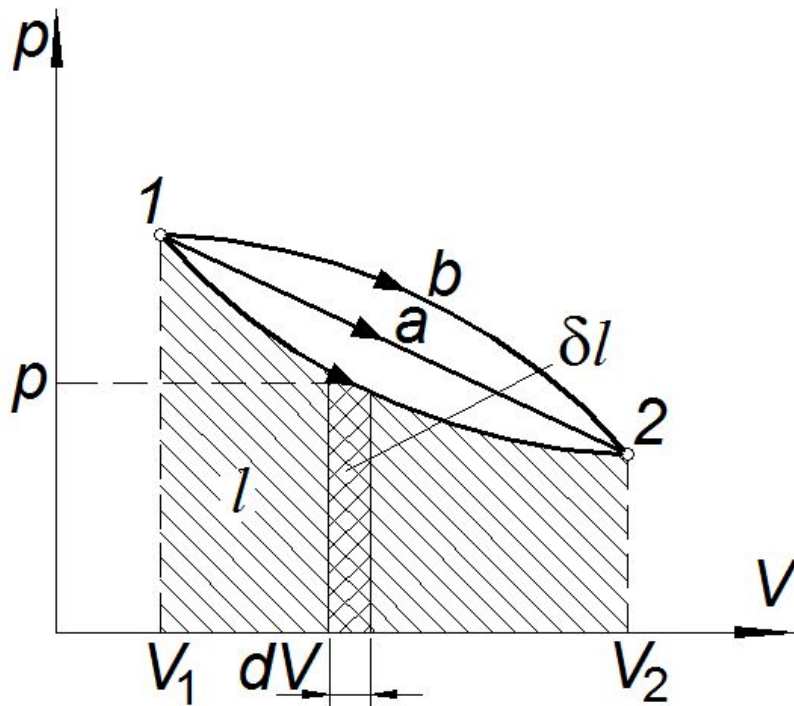
Работа, совершенная рабочим телом по перемещению поршня на расстояние dx

$$\delta L = pFdx = pdV$$

Единицей измерения работы в СИ является джоуль (Дж).

Удельная работа l измеряется в Дж/кг

Работа расширения



Таким образом, работа изменения объема эквивалентна площади под кривой процесса в диаграмме p, v .

Каждому пути перехода системы из состояния 1 в состояние 2 (например, 12 , $1a2$ или $1b2$) соответствует своя работа расширения. **Следовательно, работа зависит от характера термодинамического процесса**, а не является функцией только исходного и конечного состояний системы.

Теплота

Помимо макрофизической формы передачи энергии – работы существует также и микрофизическая, т.е. осуществляемая на молекулярном уровне форма обмена энергией между системой и окружающей средой. В этом случае энергия может быть передана системе без совершения работы.

Мерой количества энергии, переданной микрофизическим путем, служит теплота

Теплота может передаваться либо при непосредственном контакте между телами (теплопроводностью, конвекцией), либо на расстоянии (излучением), причем во всех случаях этот *процесс возможен только при наличии разности температур между телами.*

Теплота, внутренняя энергия, работа

ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ – это свойство самой системы, она характеризует состояние системы.

ТЕПЛОТА И РАБОТА – это энергетические характеристики процессов механического и теплового взаимодействия системы с окружающей средой. Они характеризуют те количества энергии, которые переданы системе или отданы ею через ее границы в определенном процессе.

В системе СИ теплота, внутренняя энергия и работа измеряются в джоулях ($1 \text{ МДж} = 10^6 \text{ Дж}$; $1 \text{ кДж} = 10^3 \text{ Дж}$). Раньше теплота измерялась в килокалориях ($1 \text{ ккал} = 4,1868 \text{ кДж}$). Работа в единицу времени, т. е. мощность, измеряется в ваттах ($1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}$), а тепловая мощность – в килокалориях в час ($1 \text{ ккал/ч} = 1,163 \text{ Вт}$; $1 \text{ Гкал/ч} = 1,163 \text{ МВт}$).

Первое начало термодинамики

ТЕПЛОТА, СООБЩАЕМАЯ ЗАКРЫТОЙ СИСТЕМЕ, ИДЕТ НА ПРИРАЩЕНИЕ ЕЕ ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИИ U НА СОВЕРШЕНИЕ РАБОТЫ РАСШИРЕНИЯ

$$\delta Q = dU + \delta L$$

Двигатель, который позволял бы получать работу без энергетических затрат, называется вечным двигателем первого рода. Ясно, что такой двигатель невозможен, ибо он противоречит первому закону термодинамики.

Поэтому первый закон можно сформулировать в виде следующего утверждения:

Вечный двигатель первого рода невозможен.

В 1755 г. Французская академия наук «раз и навсегда» объявила, что не будет больше принимать на рассмотрение какие-либо проекты вечных двигателей

Теплоемкость

ТЕПЛОЕМКОСТЬЮ C тела называют количество теплоты, которое нужно затратить в *данном процессе*, чтобы нагреть тело на один градус:
$$C = \frac{\delta q}{dt}$$

Обычно теплоемкость относят к единице количества вещества и в зависимости от выбранной единицы различают:

удельную **массовую** теплоемкость c , отнесенную к 1 кг газа, Дж/(кг · К);

удельную **объемную** теплоемкость c' , отнесенную к количеству газа, содержащегося в 1 м³ объема при нормальных физических условиях, Дж/(м³ · К);

удельную **мольную** теплоемкость μc , отнесенную к одному киломолю, Дж/(кмоль · К).

Теплоемкость

Изменение температуры тела при одном и том же количестве сообщаемой теплоты зависит от характера происходящего при этом процесса, поэтому *теплоемкость является функцией процесса*. Это означает, что одно и то же рабочее тело в зависимости от процесса требует для своего нагревания на 1 К различного количества теплоты. Численно величина c изменяется в пределах от $+\infty$ до $-\infty$.

В термодинамических расчетах большое значение имеют:

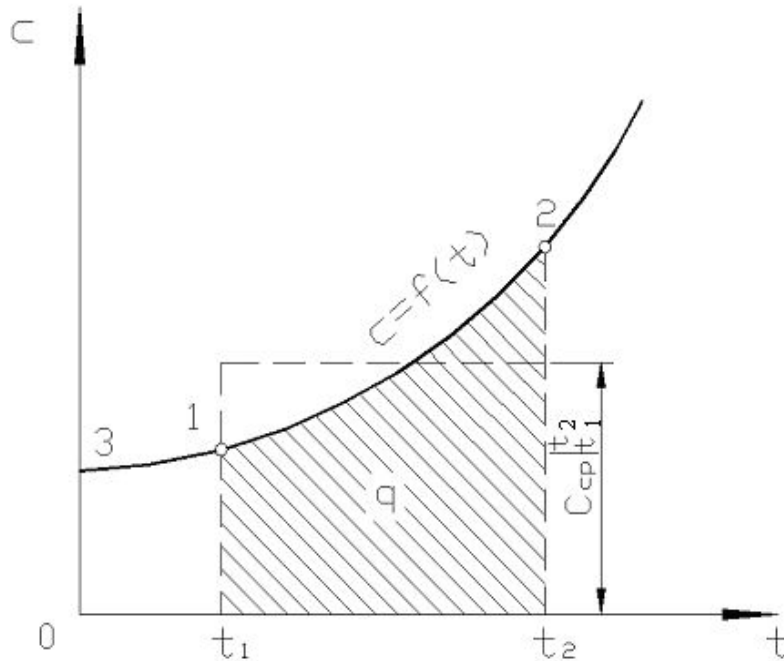
ТЕПЛОЕМКОСТЬ ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ

ТЕПЛОЕМКОСТЬ ПРИ ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ

$$c_p = c_v + R \text{ (уравнение Майера)}$$

В процессе ***$v = \text{const}$*** теплота, сообщаемая газу, идет лишь на изменение его внутренней энергии, тогда как в процессе ***$p = \text{const}$*** теплота расходуется и на увеличение внутренней энергии и на совершение работы расширения. Поэтому c_p больше c_v на величину этой работы

Теплоемкость



Величина средней теплоемкости для данного вещества (и данного процесса, т.е. c_p или c_v) зависит лишь от одной температуры t . Именно эти теплоемкости и приводятся во всех таблицах под названием «средние». Сказанное справедливо как для c (c_p и c_v), так и для c' и μc .

$$c \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{c \Big|_0^{t_2} \cdot t_2 - c \Big|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}, \quad \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Энтальпия

В термодинамике важную роль играет сумма внутренней энергии системы U и произведения давления системы p на ее объем V , называемая **ЭНТАЛЬПИЕЙ** и обозначаемая H :

$$H=U+pV$$

Поскольку входящие в нее величины являются функциями и параметрами состояния, то и сама **энтальпия является функцией состояния**. Так же как внутренняя энергия, работа и теплота, она измеряется в джоулях (Дж)

Величина $h = u + pv$, называемая удельной энтальпией ($h = H / M$), представляет собой энтальпию системы, содержащей 1 кг вещества, и измеряется в Дж/кг.

Изменение энтальпии в любом процессе определяется только начальным и конечным состояниями тела и не зависит от характера процесса.

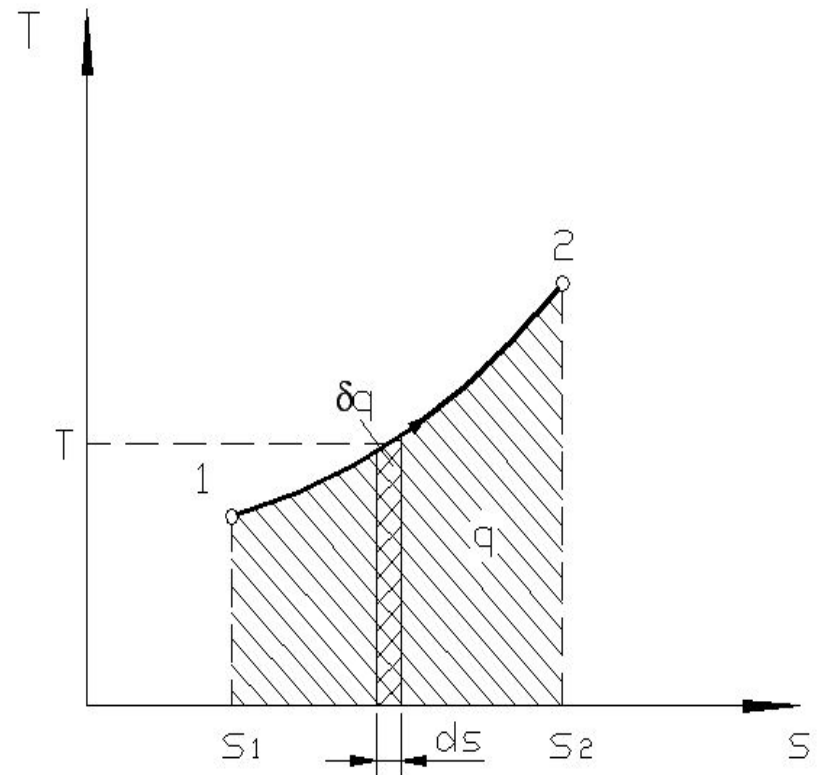
Физически энтальпия представляет собой сумму внутренней энергии и работы, которую надо совершить над рабочим телом, чтобы оно заняло объем v при постоянном давлении p . То есть это своеобразная «полная» энергия рабочего тела.

Энтропия

В 1865 г. Р. Клазиус ввел еще одну функцию – энтропию s , Дж/(кг · К)

$$ds = \frac{\delta q}{T}$$

Еще раз подчеркнем, что энтропия есть функция состояния рабочего тела. Её изменение зависит только от начальных и конечных параметров процесса и не зависит от пути перехода от одних параметров к другим (пути процесса).



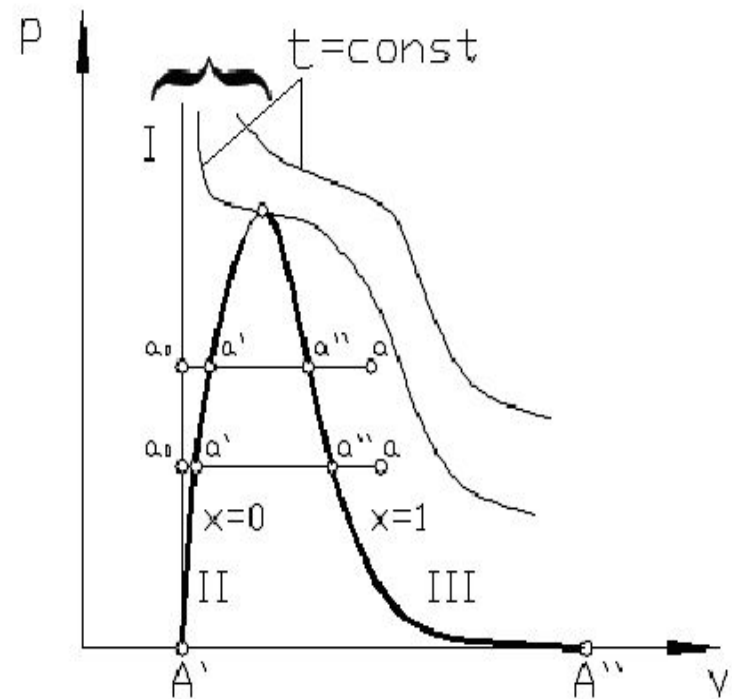
Термодинамические процессы и их характеристики

Процесс	Теплота	Работа	Δu	Δh
$P = \text{const}$	$q = c_p (t_2 - t_1)$	$l = R(T_2 - T_1)$	$\Delta u = c_v (t_2 - t_1)$	$\Delta h = c_p (t_2 - t_1)$
$V = \text{const}$	$q = c_v (t_2 - t_1)$	0	$\Delta u = c_v (t_2 - t_1)$	$\Delta h = c_p (t_2 - t_1)$
$T = \text{const}$	$q = T(s_2 - s_1)$	$q = l$	0	0
$\delta q = 0$	0	$l = \frac{R}{k-1}(T_1 - T_2)$	$\Delta u = c_v (t_2 - t_1)$	$\Delta h = c_p (t_2 - t_1)$

Термодинамические процессы реальных газов

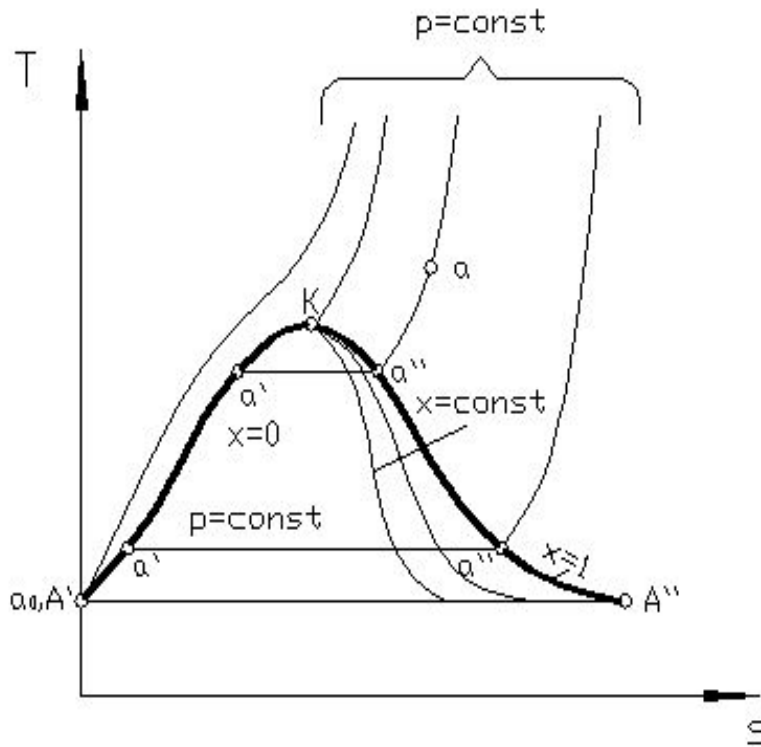
Двухфазная смесь, представляющая собой пар со взвешенными в нем капельками жидкости, называется **влажным насыщенным паром**. (II)

Насыщенный пар, в котором отсутствуют взвешенные частицы жидкой фазы, называется **сухим насыщенным паром**. Его удельный объем и температура являются функциями давления. Состояние сухого насыщенного пара обычно задают либо давлением, либо температурой (кривая насыщения)

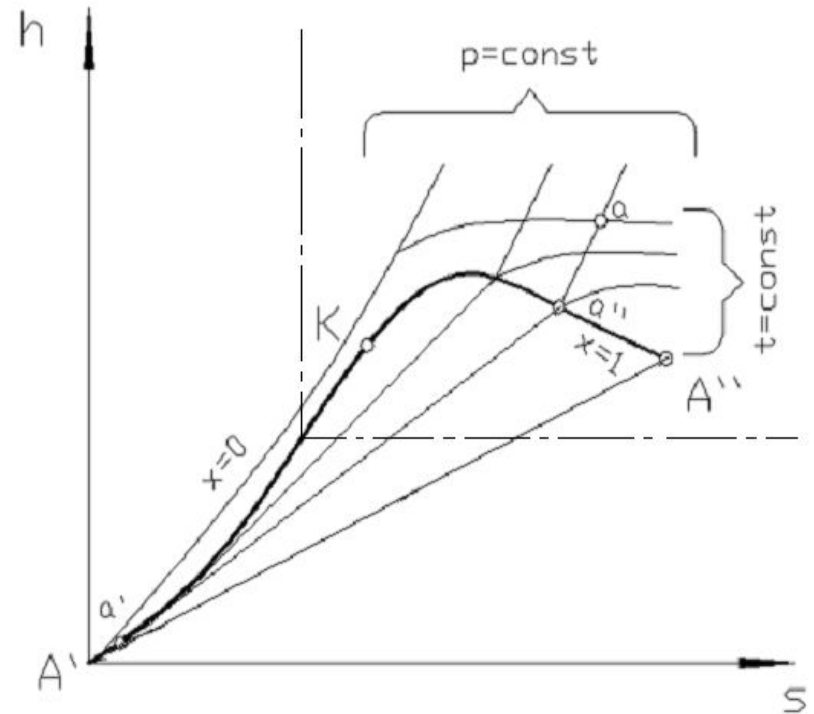


Перегретым называется пар, температура которого превышает температуру насыщенного пара того же давления (III)

Термодинамические процессы реальных газов



Т-S диаграмма воды и водяного пара



h-S диаграмма воды и водяного пара

Термодинамические процессы реальных газов

Для воды параметры критической точки K составляют:

$$p_{кр} = 221,29 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$t_{кр} = 374,15^\circ\text{C};$$

$$v_{кр} = 0,00326 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

параметры тройной точки

для воды: $p_0 = 611 \text{ Па};$

$$t_0 = 0,01^\circ\text{C};$$

$v_0 = 0,00100 \text{ м}^3/\text{кг}.$ При более

низких давлениях пар может сосуществовать лишь в равновесии со льдом.

Процесс образования пара непосредственно изо льда

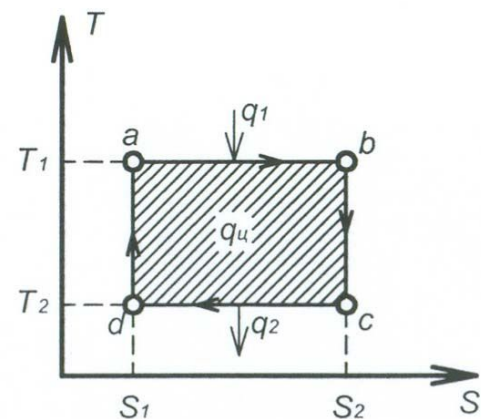
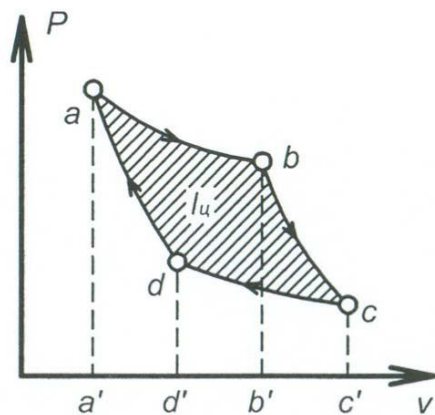
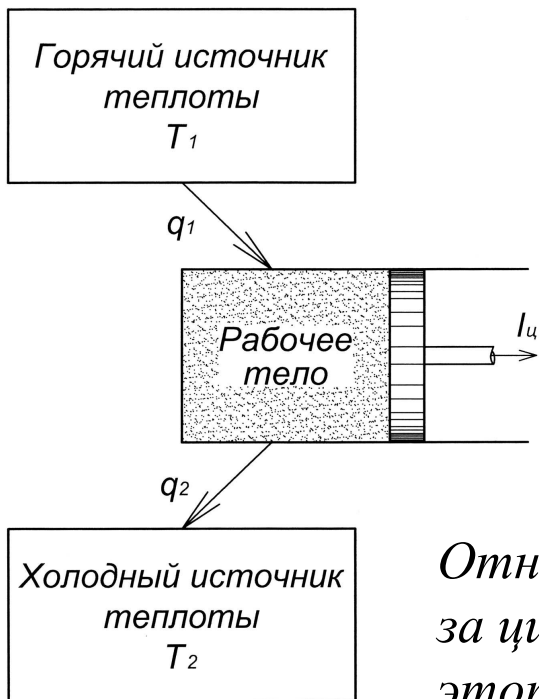
называется **сублимацией**

Термодинамические величины со штрихом относятся к воде при температуре кипения, а с двумя штрихами – к сухому насыщенному пару.

$$q = r = h'' - h'.$$

Величина r называется **теплотой парообразования** и определяет количество теплоты, необходимой для превращения одного килограмма воды в сухой насыщенный пар той же температуры. Дж/кг

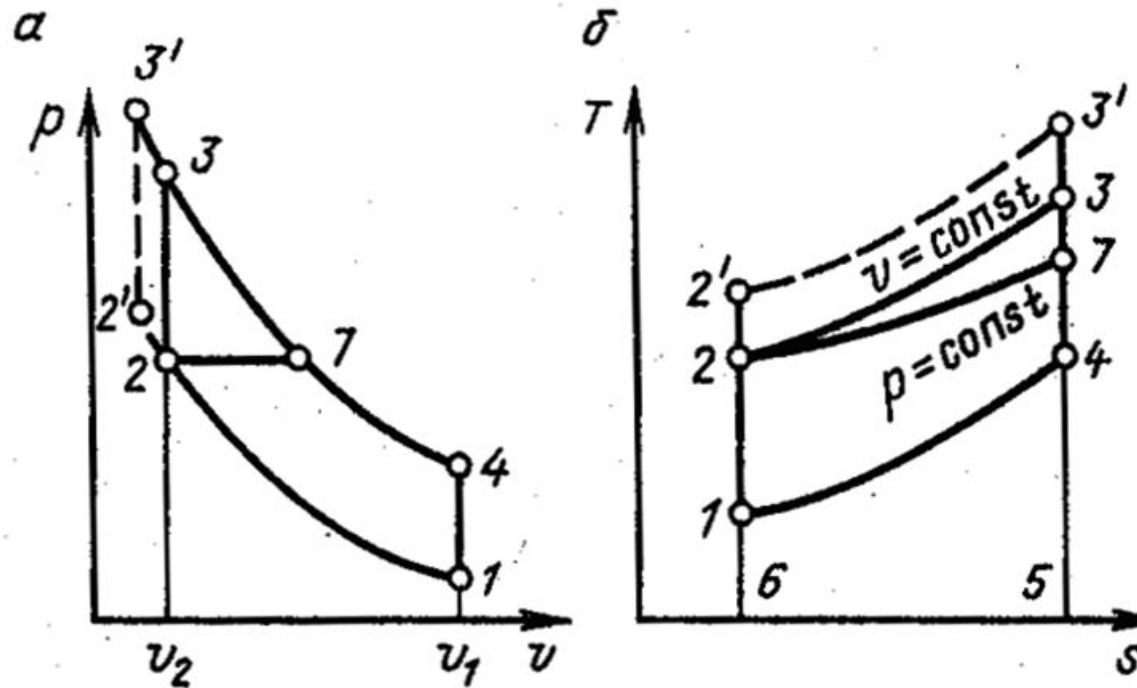
Цикл Карно



Отношение работы, производимой двигателем за цикл, к количеству теплоты, подведенной за этот цикл от горячего источника, называется термическим коэффициентом полезного действия (КПД) цикла

$$\eta_t = \frac{l_{ц}}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Циклы ДВС



При подводе
теплоты при
 $v = \text{const}$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$

Отношение полного объема
цилиндра к объему камеры
сгорания называется **СТЕПЕНЬЮ
СЖАТИЯ ДВИГАТЕЛЯ ε** .

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$$

Цикл ГТУ

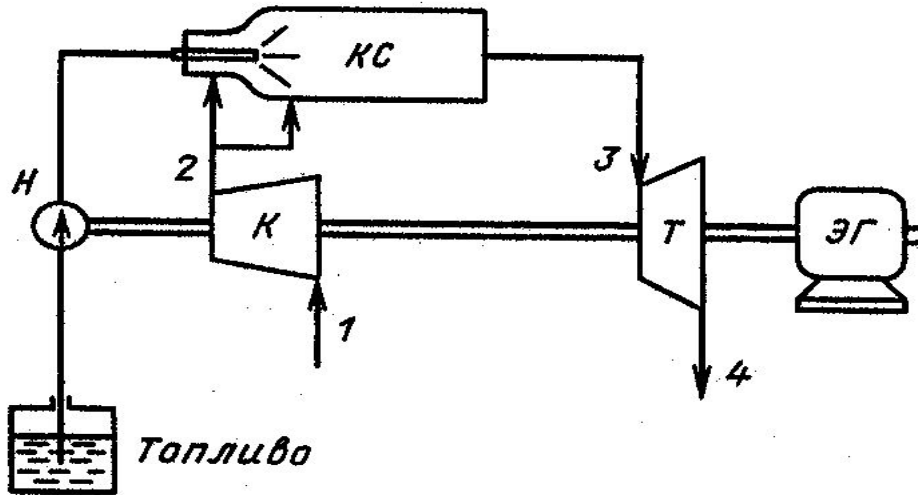
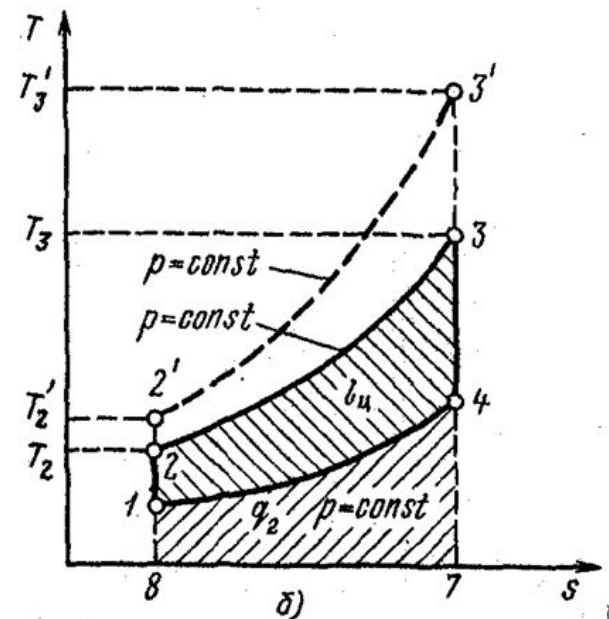
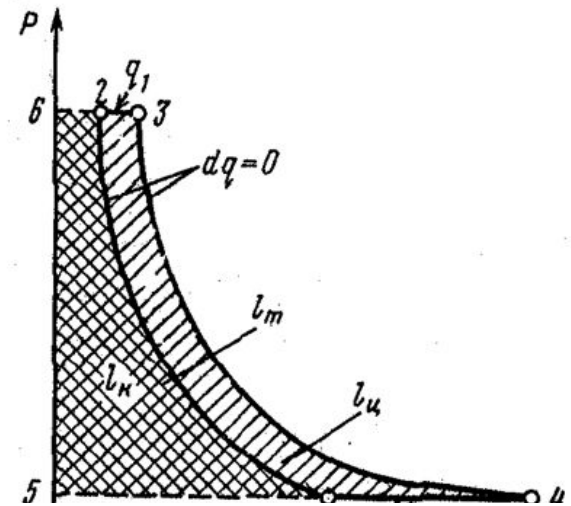


Схема газотурбинной установки

Для газотурбинных установок более удобной является **степень повышения давления в компрессоре π** , $\pi = p_2/p_1$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\pi^k}$$



Цикл паротурбинной установки

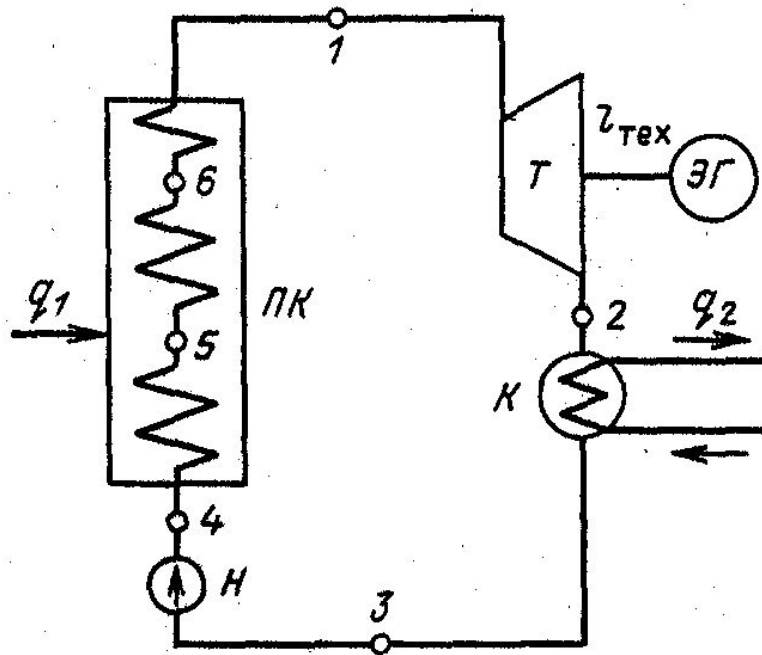
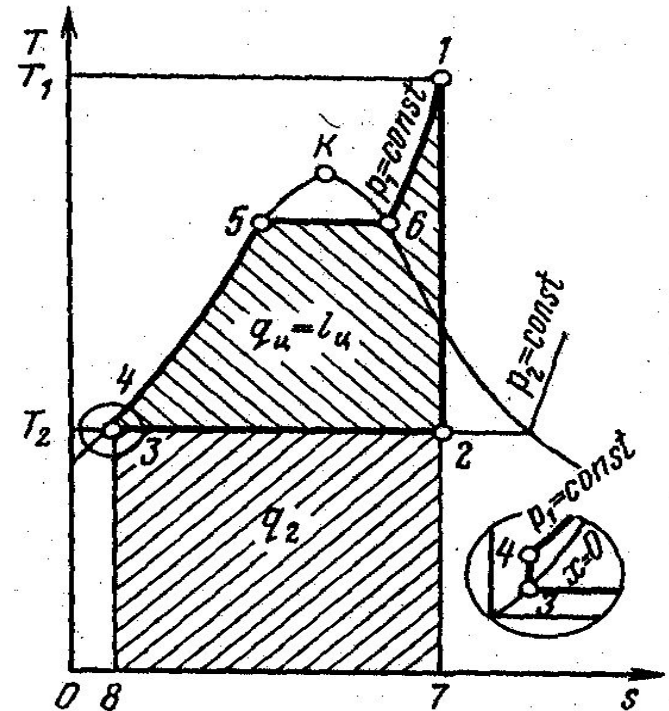


Схема паросиловой установки:
ПК – паровой котел; Т – паровая турбина; ЭГ – электрогенератор; К – конденсатор;



Цикл Ренкина на перегретом паре в T, s - координатах

Цикл паротурбинной установки

Перегрев пара увеличивает среднюю температуру подвода теплоты в цикле, не меняя при этом

температуру отвода теплоты.

Поэтому термический КПД паросиловой установки возрастает с увеличением температуры пара перед двигателем.

При уменьшении давления p_2 пара за турбиной уменьшается средняя температура t_2 отвода теплоты в цикле, а средняя температура подвода теплоты меняется мало.

Поэтому, чем меньше давление пара за турбиной, тем выше КПД паросиловой установки

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h'_2}$$

КПД идеального цикла Ренкина определяется значениями энтальпий пара до турбины h_1 и после нее h_2 и энтальпий воды, находящейся при температуре кипения t_2 . В свою очередь эти значения определяются тремя параметрами цикла: давлением p_1 и температурой t_1 пара перед турбиной и давлением p_2 за турбиной, т.е. в конденсаторе

Увеличение КПД цикла Ренкина

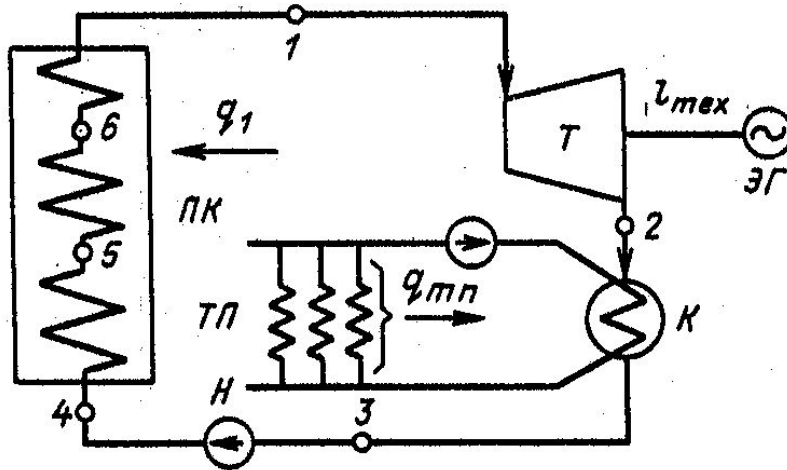


Схема установки для совместной выработки тепловой и электрической энергии:
ПК – паровой котел; Т – паровая турбина; К – конденсатор-подогреватель; Н – насос; ТП – тепловой потребитель. Цифры соответствуют точкам цикла в T,s - диаграмме

