

План лекции:

1. Нулевой закон термодинамики
2. опыты Джоуля. Эквивалентность теплоты и работы.
3. Закон сохранения и превращения энергии
4. Взаимодействие системы с окружающей средой
5. Уравнение первого закона термодинамики
6. Анализ уравнения первого закона термодинамики

1. НУЛЕВОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Понятие теплового равновесия является одним из главных исходных термодинамических понятий.

Опыт показывает, что если тела 1 и 2 находятся в тепловом равновесии с телом 3, то и тела 1 и 2 будут также в тепловом равновесии друг с другом (**закон теплового равновесия**).

Этот вытекающий из опыта закон называют иногда **нулевым началом термодинамики**. Значение этого закона заключается в том, что он приводит к выводу о существовании температуры как характеристики теплового равновесия тела. Температура - это присущая каждому состоянию равновесия интенсивная величина: у всех тел, находящихся в тепловом равновесии друг с другом, температуры одинаковы. Наоборот, у тел, не находящихся в тепловом равновесии, температуры различны. Температура определяет направление перехода теплоты.

2. ОПЫТЫ ДЖОУЛЯ. ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ ТЕПЛОТЫ И РАБОТЫ.

Теплота является одним из наиболее важных понятий термодинамики. По своему существу понятие теплоты близко к понятию работы. **Теплота и работа являются формами передачи энергии**. Различие между теплотой и работой состоит в том, что они являются различными формами передачи энергии.

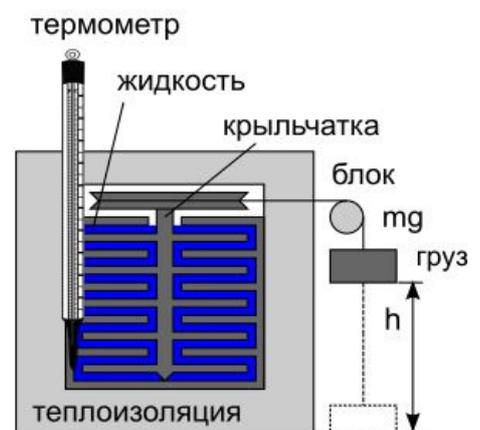
Теплота представляет собой такую форму передачи энергии, которая определяется либо непосредственным контактом между телами (теплопроводность, конвекция), либо лучистым переносом энергии (от одних частиц вещества к другим).

Работа представляет собой иной механизм передачи энергии. В случае механической работы обязательно имеет место изменение объема тела.

В 1844 - 1854 гг. английский физик Джоуль провел опыты, которым было суждено сыграть большую роль в науке.

Цель, которую поставил перед собой Джоуль, состояла в том, чтобы установить соотношение между работой, затрачиваемой при выделении теплоты, и количеством выделившейся теплоты.

Схема опыта Джоуля представлена на рисунке. В теплоизолированный медный сосуд заполненный водой, погружена мешалка, снабженная лопатками (крыльчатка). К стенкам сосуда также прикреплены лопатки, затрудняющие движение воды при вращении



мешалки. Мешалка приводится во вращение посредством опускания связанного с ней тросом через блок груза весом mg . При опускании на высоту h работа, производимая грузом и, следовательно, мешалкой, равняется убыли потенциальной энергии груза mgh . **Теплота, выделившаяся в сосуде с водой, вычисляется по повышению температуры воды, измеряемой термометром.**

В результате серии тщательно поставленных опытов Джоуль установил, что между затраченной работой L и количеством полученной теплоты Q существует прямая пропорциональность:

$$Q = AL,$$

где A - коэффициент пропорциональности. **Джоуль нашел, что коэффициент пропорциональности A всегда сохраняет одно и то же значение независимо от способа получения теплоты, вида работы, температуры тела и т. д.**

Таким образом Джоуль установил, что при затрате одной и той же работы выделяется всегда одна и та же теплота. Полученная теплота всегда эквивалентна затраченной работе и, соответственно, наоборот.

Коэффициент пропорциональности A носит название механического эквивалента теплоты и устанавливает связь между различными единицами измерения теплоты и работы.

Единицы	Дж	эрг	кгс · м	ккал	кВт · ч
Дж	1	10^7	0,101972	$2,38846 \cdot 10^{-6}$	$2,7778 \cdot 10^{-7}$
эрг	10^{-7}	1	$10,1972 \cdot 10^{-9}$	$23,8846 \cdot 10^{-12}$	$27,778 \cdot 10^{-15}$
кгс · м	9,80665	$98,0665 \cdot 10^6$	1	$2,34228 \cdot 10^{-3}$	$2,72407 \cdot 10^{-6}$
ккал	4186,8	$41,868 \cdot 10^9$	426,935	1	$1,163 \cdot 10^{-3}$
кВт · ч	$3,6 \cdot 10^6$	$36 \cdot 10^{12}$	367098	859,845	1

Как правило, для упрощения обозначений в термодинамических уравнениях теплота и работа будут измеряться в одинаковых единицах.

3. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ И ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Закон сохранения и превращения энергии является фундаментальным законом природы, имеющим всеобщий характер.

Этот закон гласит: **энергия не исчезает и не возникает вновь, она лишь переходит из одного вида в другой в различных физических и химических процессах.**

Иными словами, для любой изолированной системы (т. е. такой термодинамической системы, которая не обменивается с окружающей средой ни теплотой, ни работой, ни веществом) энергия, заключенная в этой системе, сохраняется неизменной.

Закон сохранения энергии был давно известен в механике применительно к механической (кинетической и потенциальной) энергии. После того как работами Джоуля

и других ученых был установлен принцип эквивалентности теплоты и работы, закон сохранения был распространен на другие виды энергии и в соответствии с его содержанием стал называться **законом сохранения и превращения энергии**.

В настоящее время известны различные виды энергии: теплового движения микрочастиц, составляющих тело; кинетическая энергия всего тела в целом; гравитационного поля (в частности, потенциальная энергия тела, поднятого над землей); электрического поля; магнитного поля; электромагнитного излучения; внутриядерная и др. Закон сохранения и превращения энергии устанавливает однозначную связь между всеми видами энергии в процессе их взаимопревращений.

Закон сохранения и превращения энергии носит также название **первого закона термодинамики**. Следует еще раз подчеркнуть, что первый закон термодинамики имеет всеобщий характер.

4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СИСТЕМЫ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

Рассмотрим **закрытую термодинамическую систему**. При взаимодействии системы с окружающей средой, в ходе термодинамического процесса её состояние изменится; это изменение состояния вызовет изменение внутренней энергии, которое определяется разностью:

$$\Delta U = U_2 - U_1 \quad (1)$$

Если система заключена в **абсолютно жесткую и теплоизолированную оболочку**, то она изолирована от внешней среды и не может обмениваться с окружающей средой энергией ни в форме теплоты, ни в форме механической работы. В этом случае **на основании закона сохранения энергии** можно утверждать, что запас внутренней энергии такой системы постоянен:

$$\Delta U = 0 \quad (2)$$

Если система находится в **абсолютно жесткой оболочке, но не является теплоизолированной**, то может происходить теплообмен с окружающей средой. Система может получить энергию путем непосредственного перехода ее от других тел без совершения при этом механической работы. Полученную таким образом энергию называют теплотой Q . Теплота, полученная системой из окружающей среды, увеличит на такую же величину её внутреннюю энергию:

$$\Delta U = Q \quad (3)$$

В термодинамике принято теплоту, полученную системой, считать положительной, а отдаваемую — отрицательной.

Если система находится в **свободно расширяющейся теплоизолированной оболочке**, то вследствие увеличения объема система воздействует на окружающую среду, преодолевая внешнее давление, или, наоборот, уменьшает свой объем под влиянием внешнего давления. При расширении системы ею производится работа вследствие убыли внутренней энергии системы, а при сжатии работа внешних сил идет на увеличение внутренней энергии системы.

$$\Delta U = -L \quad (4)$$

Принято работу, производимую системой, считать положительной, а работу, расходуемую окружающей средой на сжатие системы, — отрицательной.

Если в процессе взаимодействия системы и окружающей среды возможна передача энергии, как в виде теплоты, так и в виде механической работы, то уравнение происходящего термодинамического процесса имеет вид:

$$\Delta U = Q - L \quad (5)$$

5. УРАВНЕНИЕ ПЕРВОГО ЗАКОНА ТЕРМОДИНАМИКИ

Уравнение первого закона термодинамики выражает те изменения, которые вызываются в термодинамической системе при подводе к ней некоторой энергии в виде теплоты или работы. Предположим, что взаимопреобразование происходит в закрытой системе только между теплотой и механической работой. Изменением потенциальной энергии, связанной с положением тела, пренебрегаем. Тело считаем неподвижным.

Если к системе массой m , подвести теплоту dQ , то это приведёт к изменению её температуры и объема. При этом изменится внутренняя энергия системы, dU и газ совершит работу против внешних сил dL или $p \cdot dV$, если ограничиться рассмотрением только силы давления. Запишем дифференциальное уравнение баланса энергии:

$$dQ = dU + dL$$

или

$$\boxed{dQ = dU + p \cdot dV}$$

или на единицу массы, как:

$$mdq = m \cdot du + mp \cdot dv$$

или

$$\boxed{dq = du + p \cdot dv}$$

Т.к. внутренняя энергия однозначно определяется двумя параметрами системы (см. Лекцию №3), то полный дифференциал u можно записать в следующем виде:

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T dv \quad (8)$$

Подставляя полученное выражение в первое начало термодинамики, получим:

$$\boxed{dq = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT + \left(\left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + p \right) dv} \quad (9)$$

Из свойств **идеального газа** следует, что внутренняя энергия газа зависит только от температуры, значит $\left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T = 0$. Из **определения массовой теплоёмкости в процессе с**

постоянным объёмом $v = \text{const}$, $dv = 0$ следует $c_v = \left(\frac{du}{dT} \right)_v$. Используя (9) первый закон можно записать так:

$$\boxed{dq = c_v dT + pdv} \quad (10)$$

Прибавим и отнимем в выражении (7) член vdP , тогда:

$$dq = du + pdv + vdp - vdp,$$

$$dq = d(u + pv) - vdp, \quad (11)$$

$$\boxed{dq = dh - vdp},$$

где: h , [Дж / кг] - удельная энтальпия газа.

Т.к. энтальпия однозначно определяется двумя параметрами системы (см. Лекцию №3), то полный дифференциал h можно записать в следующем виде:

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p dT + \left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_T dp \quad (12)$$

По аналогии для процесса с постоянным давлением можно получить:

$$\boxed{dq = c_p dT - v dp} \quad (13)$$

Используя запись первого закона термодинамики в форме (10) и (13) можно показать справедливость уравнения Майера для идеального газа. Для процесса с постоянным давлением следует:

$$\begin{aligned} dq &= c_p dT \\ \text{и} \\ dq &= c_v dT + p dv \end{aligned} \quad (14)$$

Приравнивая эти соотношения, получим:

$$\begin{aligned} (c_p - c_v) dT &= p dv \\ \text{или} \\ c_p - c_v &= p \left(\frac{dv}{dT} \right)_p \end{aligned} \quad (15)$$

Последнее слагаемое из уравнения состояния идеального газа можно привести к виду:

$$p \left(\frac{dv}{dT} \right)_p = p \left(\frac{d}{dT} \frac{RT}{p} \right) = R \quad (16)$$

Отсюда:

$$c_p - c_v = R \quad (17)$$

6. АНАЛИЗ УРАВНЕНИЯ ПЕРВОГО ЗАКОНА ТЕРМОДИНАМИКИ

В математическое выражение первого закона термодинамики входят величины, характеризующие тепловое состояние рабочего тела (термодинамической системы) и изменение его в термодинамическом процессе.

Внутренняя энергия и энтальпия определяют запас энергии в рабочем теле (системе) и имеют в каждом состоянии вполне определенное значение.

Обе величины являются функциями от параметров состояния, а du и dh полными дифференциалами этих функций. **Изменение этих величин в процессе равно разности их значений в конечном и начальном состояниях.**

Можно считать, что внутренняя энергия и энтальпия определяются с точностью до некоторой постоянной:

$$\begin{aligned} U &= \int (dQ - p dV) + U_0 \\ H &= \int (dQ + V dp) + H_0 \end{aligned} \quad (18)$$

Для газа с постоянной теплоёмкостью изменение внутренней энергии и энтальпии в процессе можно рассчитать следующим образом:

$$\begin{aligned}\Delta U &= mc_v (T_2 - T_1) \\ \Delta H &= mc_p (T_2 - T_1)\end{aligned}\quad (19)$$

Внутренняя энергия и энтальпия являются **аддитивными величинами**.

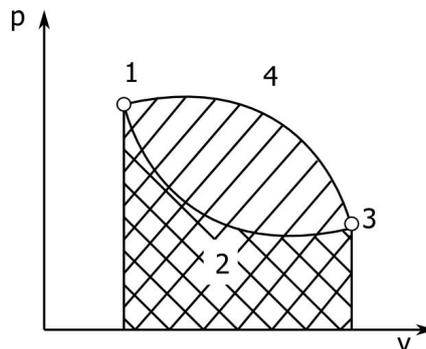
В процессе изменения состояния рабочее тело, увеличивая свой объем, производит работу по преодолению внешних сил, действующих на него. Такая работа носит название **работы расширения**.

Если в процессе изменения состояния газ уменьшает свой объем, то это происходит под воздействием внешнего давления, и работу, совершаемую над газом, называют **работой сжатия**.

Работа газа определяется уравнением:

$$dL = pdV \quad \text{или} \quad L = \int_1^2 pdV = \int_{V_1}^{V_2} p(V) dV \quad (20)$$

Если взять систему координат $p - V$, то процесс, определяемый условием $p = f(V)$, изобразится в виде кривой 1-2-3. Работа газа в процессе изменения состояния от точки 1 до точки 3 - площадью, под кривой процесса 1-2-3. Работа расширения положительна. Для процесса, изображенного кривой 1-4-3, работа будет определяться площадью под этой кривой. Работа сжатия отрицательна. Если в процессе система возвращается в своё первоначальное состояние, то работа системы в процессе будет являться площадью замкнутого цикла.



В **реальных условиях** при сжатии газа в цилиндре компрессора к поршню необходимо прикладывать большее давление, чем давление необходимое для сжатия газа, для возможности движения поршня со скоростью, отличной от нуля, так как при сжатии газа обязательно имеет место трение, неравновесность и турбулизация. В результате при сжатии необходимо совершить большую работу, чем в идеальном (обратимом, равновесном) процессе.

Наоборот, в процессе расширения газа действительная работа будет меньше, чем полученная в идеальном (обратимом, равновесном) процессе.

Разница между действительной работой и работой в идеальных процессах называется **работой диссипации**. При дальнейшем изложении будем рассматривать только работу в обратимых и равновесных процессах.