

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**Князева Анна Георгиевна – д.ф.-м.н.,
профессор кафедры гнс ИФПМ СО РАН**

Модуль 1.

ПРИМЕРЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

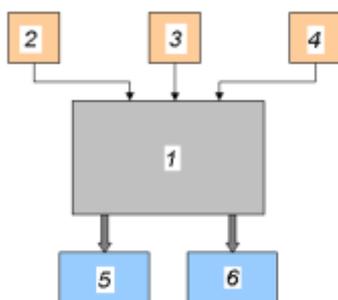
- лазерная и электронная технологии (сварка, резка, термическая обработка);
- дуговая сварка диффузионная пайка; термитная и СВЧ-сварка;
- плазменные технологии нанесения покрытий и поверхностной обработки;
- ионные технологии;
- кислородная резка;
- совмещенные технологии резки, сварки, наплавки;
- процессы получения тонких пленок и выращивание монокристаллов;
- многие процессы химической и диффузионной обработки поверхностей материалов и др.
- многие технологии получения новых материалов в химической промышленности;
- технологии переработки и сжигания природного топлива;
- различные металлургические процессы.

Во всех высокотемпературных технологиях происходит преобразование различных видов энергии в тепловую энергию и (или) ее непосредственное использование для получения, переработки и модификации материалов и их поверхностей

2

Особенности высокотемпературных технологий:

- существенная неравновесность процессов, связанная с неоднородным распределением температуры и ее изменением во времени;
- высокие скорости нагрева и охлаждения различных элементов системы;
- наличие сложного теплообмена;
- существование нескольких различных фаз; соотношение между которыми изменяется;
- разнообразные физико-химические явления, сопутствующие нагреву и охлаждению или лежащие в основе технологии.



Блочная структура технологического процесса. 1 – технологическая камера; 2 – основные энергетические источники; 3 – вспомогательные энергетические источники; 4 – материальные потоки; 5 – готовый продукт; 6. – технологические отходы

3

ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Принципиальной особенностью высокотемпературных технологий является использование современных высокоэнергетических источников, поэтому целесообразно рассмотреть некоторые наиболее характерные источники тепла

Источники тепла, используемые в ВТП, могут быть **поверхностными** или **объемными**; **непрерывными, импульсными и импульсно-периодическими**; **сосредоточенными и распределенными**; **неподвижными и движущимися**.

Поверхностные источники: технологический электронный луч; лазерное излучение различных длин волн, действующее на металлы; потоки плазмы, генерируемые плазмотронами или другими методами; сварочная дуга; световое излучение широкого спектрального диапазона (например, сфокусированное излучение ксеноновых ламп).

Один и тот же источник при разных пространственно-временных масштабах может быть отнесен к разным типам. Например, при действии лазерного излучения на некоторые диэлектрики выделение и поглощение энергии происходит не на поверхности, а в объеме вещества. При увеличении мощности электронного луча максимум энерговыделения также смещается в объем материала

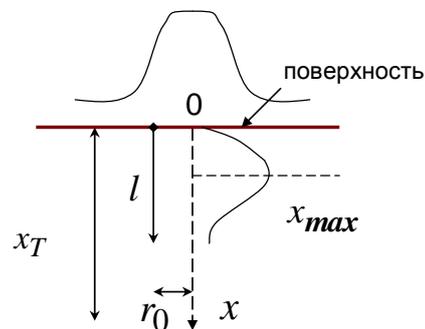
4

Типично для поверхностного источника тепла

$$l \ll x_T$$

x_T — характерный тепловой масштаб

x_{max} — координата максимального тепловыделения



Традиционные объемные источники теплоты характеризуются относительно большим временем нагрева до рабочей температуры (от долей секунды до нескольких минут или даже часов). В некоторых ВЧ-плазмотронах выход на рабочий режим может составлять тысячные доли секунды. Мощность объемных источников достигает нескольких сотен киловатт или даже мегаватт, в то же время концентрация энергии обычно невелика по сравнению с так называемыми концентрированными источниками

Основными областями применения объемных источников теплоты в ВТП являются плавка металлов, выращивание монокристаллов, получение пленок методом термического испарения в вакууме, химико-термическая обработка материалов и др.

5

Пространственно-временные характеристики источников тепла

(распределение энергии по объему или по поверхности, временные параметры) играют существенную роль в ВТП. Наиболее распространенным типом источников являются гауссовы, излучение которых распределено по поверхности в соответствии с законом нормального распределения. При разработке ВТП часто ставится задача управления пространственно-временными характеристиками источников для получения оптимального в том или ином смысле ВТП.

Обычно концентрированными источниками энергии называют те, зоны воздействия (пятно нагрева) которых на обрабатываемое тело малы по сравнению с характерными размерами тела.

Из числа концентрированных источников условно выделяют высококонцентрированные источники энергии (ВКИЭ), удельная мощность (плотность мощности) которых на определенном участке превышает **10^4 Вт/см²**. К ВКИЭ относят **потоки электронов и ионов**, сфокусированные на поверхности тел, **струи и сгустки** низкотемпературной **плазмы**, генерируемые с помощью специальных устройств – дуговых плазмотронов, взрывных плазменных генераторов, сфокусированное **излучение лазеров** различных типов. Под действием ВКИЭ на участках металлических тел температуру, близкую к температуре плавления, получают за несколько миллисекунд. ВКИЭ могут быть как импульсными (импульсно-периодическими), так и непрерывными. Мощность импульсных ВКИЭ может существенно превышать единицы мегаватт, а непрерывных – достигать мощностей единиц и даже десятков мегаватт.

6

Технологический электронный луч (ТЭЛ)

Как источник энергии для ВТП ТЭЛ применяется с конца 50-х годов.

Сущность процесса электронно-лучевой обработки заключается в том, что кинетическая энергия электронов, ускоренных в электрическом поле, при соударении с обрабатываемым изделием, помещенным в вакуумную камеру, превращается в тепловую. Глубина проникновения электронов (длина пробега) в твердое тело зависит от ускоряющего напряжения и плотности обрабатываемого вещества. Так, для ускоряющего напряжения в десятки киловольт глубина проникновения электронного потока в металлы составляет десятки микрометров

Так как диапазон мощности и плотности энергии в электронном луче велик (до единиц мегаватт и 10 Вт/см² и выше), возможно получение всех видов термического воздействия ТЭЛ на материалы: нагрев до заданных температур, плавление практически любых материалов; испарение с весьма большими скоростями

Электронно-лучевые технологии: плавка и испарение в вакууме, сварка и прецизионная обработка. Обычно обработку проводят в среднем вакууме, когда потери мощности ТЭЛ на рассеяние невелики. При плавке и испарении в вакууме, для нанесения пленок и покрытий используют мощные (до нескольких мегаватт) электронно-лучевые печи при ускоряющем напряжении 20-30 кВ. Плотность мощности здесь относительно невелика и обычно не превышает 10^4 - 10^5 Вт/см². Преимущество электронно-лучевой переплавки перед дуговой обусловлено частичным удалением вредных примесей из переплавляемого металла и повышением однородности слитков. Использование ТЭЛ для нанесения пленок дает возможность получить скорости напыления, практически недостижимые для других методов нанесения пленок и покрытий. Для сварки металлов – основного направления в применении ТЭЛ для ВТП – мощность сварочных установок обычно составляет от 1 до 120 кВт и более при максимальной удельной мощности 10^5 - 10^6 Вт/см².

Лазерная технология (ЛТ)

Взаимодействие излучения лазера с веществом приводит к поглощению электромагнитной энергии в тонком поверхностном слое металла, а в случае диэлектриков и полупроводников лазерное излучение может проникать вглубь объема, создавая объемный источник теплоты. Поглощение энергии излучения приводит к процессам тепло- и массообмена, протекающим на поверхности и в объеме материала. Теплофизические процессы играют существенную роль в развитии явлений и в значительной степени определяют результат воздействия излучения на вещество.

Развитие ЛТ началось практически одновременно с созданием первых лазеров (1960 г.). В настоящее время лазерная технология относится к числу наиболее развивающихся. Она применяется при поверхностной закалке, легировании, плавке, сварке, пробивании отверстий и др.

При обработке материала основное значение имеют **энергетические параметры – энергия, мощность, длительность воздействия**, пространственно – временное распределение плотности мощности, условия фокусировки, физические свойства материалов (коэффициенты поглощения, теплопроводность, плотность и т.д.).

В промышленной технологии используются лазеры нескольких типов, различающиеся длиной волны (от 0,7 до 10,6 мкм) и видом генерации излучения (непрерывное, импульсно-периодическое, импульсное). Наибольшее распространение получили импульсные лазеры для электронной промышленности, радиопромышленности, приборостроения и др., средняя мощность которых не превышает 1 кВт, хотя в импульсе мощность может превосходить сотни и тысячи киловатт.

Промышленные лазеры с большой непрерывной мощностью более 1-5 кВт весьма перспективны для сварки, термообработки и других технологических процессов в машиностроении, станкостроении, автомобильной и других отраслях промышленности.

Интенсивно разрабатываются конструкции импульсно-периодических лазеров, перспективных для технологических процессов получения и обработки материалов.

8

Ионно-плазменные технологии

Применение плазм для металлургии и обработки материалов в машиностроении и др. отраслях активно началось в конце 50-х годов. Первоначально основное внимание было сосредоточено на таких технологических процессах как сварка и резка металлов. В дальнейшем плазменная технология начала активно применяться в металлургических процессах, включая процессы восстановления и синтеза, переплавки и рафинирования тугоплавких металлов, получения порошковых материалов, сфероидизации частиц, нанесения покрытий и др.

Генерация низкотемпературной плазмы осуществляется двумя основными способами – **с помощью дуги прямого действия** (когда один из электродов, обычно – анод, является одновременно обрабатываемым материалом) или **с помощью ионизованного газа**, который подается через отверстие в аноде в свободное пространство. Обработка материала производится при введении в плазму дисперсионных материалов, проволоки, которая плавится, дробится на мелкие капли под действием газового потока и подвергается плазменной обработке.

Наряду с дуговой плазмой в технологических процессах используется **ВЧ- и СВЧ-плазма**. ВЧ-плазма зажигается внутри кварцевого цилиндра и практически не контактирует со стенками камеры, что делает ее «стерильной», т.е. не загрязненной продуктами испарения. ВЧ-плазма обычно неравновесна, и это дает возможность получения веществ с уникальными свойствами.

Плазменный поток распределен по некоторому закону, при этом максимум мощности приходится на центральную часть зоны воздействия – анодное пятно. В некотором приближении можно считать интенсивность теплового источника распределенной по нормальному закону. Плотность потока в анодном пятне может достигать 10^6 Вт/см², а в свободной плазменной струе, истекающей в пространство, она несколько ниже – до 10^4 Вт/см².

Особенно перспективным является использование плазменных процессов в металлургии и технологии неорганических материалов. Достоинства плазменной технологии обусловлены не только высокой интенсивностью энергетических потоков, но и возможностью проведения плазмо-химических реакций, приводящих к синтезу новых веществ

9

Роль математического моделирования в разработке современных технологий

Использование технологических процессов такого типа, как лазерная, электронно-лучевая и плазменная технологии приводит к необходимости решать специальные задачи проектирования технологических процессов, составной частью которого является математическое моделирование. Для сложных технологических процессов **математическая модель** является основным инструментом, позволяющим проводить как **предварительные исследования**, так и **оптимизировать разработанную технологию**.

Математическое моделирование в области современных технологий включает

- исследование и разработку физических и математических моделей технологических процессов;
- разработку аналитических и численных методов решения нелинейных теплофизических задач, соответствующих моделям разных технологий;
- получение инженерных соотношений для описания температурных и концентрационных полей в процессах обработки материалов;
- исследование и разработку и методов решения обратных задач (в том числе, теплообмена) как средства проектирования технологических процессов;
- изучение сопряженных и связанных задач для получения более полной информации о тепло- и массопереносе в процессах обработки материалов, нахождение условий оптимизации технологических процессов и методов их реализации;
- нахождение условий контроля, управления и регулирования технологических процессов.

Вычислительный эксперимент (ВЭ) используется как во время предварительного анализа технологического процесса (при идентификации параметров модели – как составная часть решения обратных задач, при проверке адекватности и при исследовании технологического процесса), так и в ходе синтеза технологических процессов – для проверки и сравнения проектных решений.

Необходимость использования ВЭ как метода исследования вызвана тем, что решение современных научно-технических задач, отличающихся чрезвычайно сложным математическим описанием, традиционными методами становится затруднительным, а в некоторых случаях вообще невозможным.

ВЭ имеет и некоторые, присущие только ему, особенности

Во-первых, оказывается возможным проведение «эксперимента» в достаточно широком диапазоне значений параметров процесса и установки без модификации существующих установок или разработки новых. Благодаря этому возможно проведение большой серии экспериментов за сравнительно небольшое время.

Во-вторых, появляется возможность управлять детальностью анализа процесса, что особенно важно при малых размерах области протекания процесса и его малой длительности, характерных для лазерной и плазменной технологий.

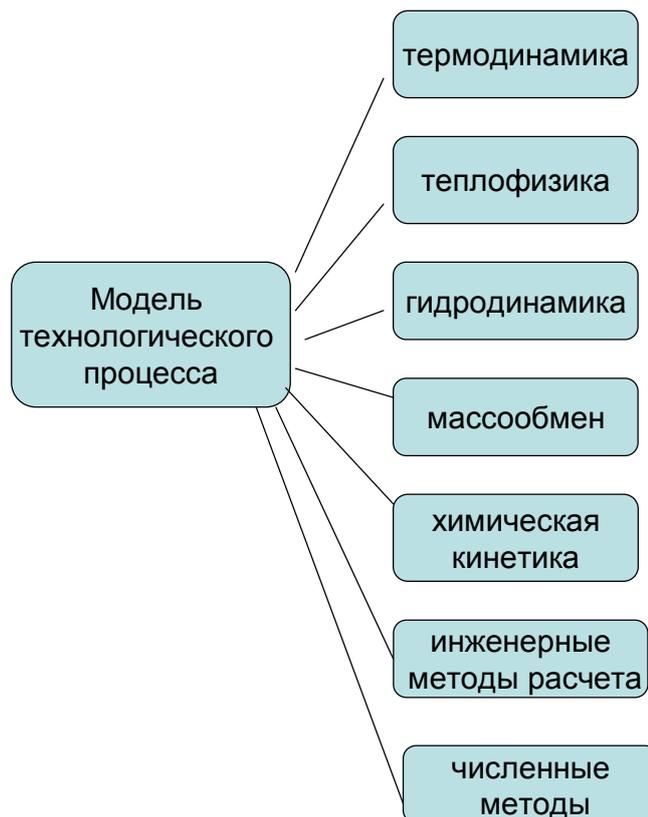
В-третьих, изучаемые физические процессы часто имеют исключительно сложный характер из-за комплексного воздействия разных физических явлений. ВЭ позволяет изучать влияние каждого явления в отдельности.

В-четвертых, в случае зависимости физического процесса от большого числа параметров, влияние каждого из них также можно исследовать в отдельности.

В-пятых, возможно проведение большого числа экспериментов без модификации установки на основе банка моделей физических процессов.

В-шестых, ВЭ позволяет определить причины несоответствия результатов натурального эксперимента теоретическим (аналитическим) прогнозам посредством многократного «проигрывания процесса» для различных условий его проведения.

Таким образом, математическое моделирование, в том числе ВЭ, являются в исключительно целесообразными.



Количественные характеристики переноса теплоты

Ясно, что определяющую роль в высокотемпературных технологических процессах играют явления, связанные с переносом тепла и массы, поэтому для направленного формирования зон обработки и оптимального управления вводом энергии в вещество необходимо знать их пространственно-временные характеристики

Интенсивность переноса теплоты характеризуется плотностью теплового потока, т.е. количеством теплоты, передаваемой в единицу времени через единичную площадь поверхности. Эта величина измеряется в **Вт/см²** или **Дж/(см²с)**

$$q$$

Количество теплоты, передаваемое в единицу времени через произвольную поверхность F , в теории теплообмена принято называть мощностью теплового потока или просто тепловым потоком. Единицей ее измерения служит **Дж/с** или **Вт**

$$Q$$

Количество теплоты, передаваемое за произвольный промежуток времени τ через произвольную поверхность F (энергия)

$$Q_\tau$$

$$q = Q/F = Q_\tau / F\tau$$

$$(1)^{13}$$

Отношение теплообмена к термодинамике

Первый закон термодинамики

теплота, сообщаемая системе, идет на приращение ее внутренней энергии и на совершение работы

$$\delta Q_{\tau} = dU + \delta A \quad (2)$$

$dU > 0$ если внутренняя энергия системы возрастает

$\delta A > 0$ если работа совершается самой системой.

Это равенство можно переписать для удельных величин (отнесенных к единице массы)

$$\delta q_{\tau} = du + \delta w \quad \text{Дж/кг}$$

Под **внутренней энергией** в термодинамике понимают энергию хаотического движения молекул и атомов, включающую энергию поступательного, вращательного и колебательного движений, как молекулярного, так и внутримолекулярного, а также потенциальную энергию взаимодействия между молекулами. Кинетическая энергия молекул является однозначной функцией температуры; значение потенциальной энергии зависит от среднего расстояния между молекулами, и, следовательно, от занимаемого объема. Поэтому внутренняя энергия есть некоторая однозначная функция состояния

14

Джо́уль (*Joule*; обозначение: **Дж**, **J**) — единица измерения работы и энергии в системе СИ. Джоуль равен работе, совершаемой при перемещении точки приложения силы, равной одному ньютону, на расстояние одного метра в направлении действия силы. В электричестве джоуль обозначает работу электрического тока величиной 1 ампер, совершаемую им при прохождении через сопротивление 1 Ом за 1 секунду

Джоуль был введён на Втором международном конгрессе электриков, проходившем в год смерти Джеймса Джоуля (1889), в абсолютные практические электрические единицы в качестве единицы работы и энергии электрического тока

В других системах единиц:

1 Дж = $\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2} = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Вт} \cdot \text{с}$.
1 Дж $\approx 6,2415 \times 10^{18}$ эВ.
1 000 000 Дж $\approx 0,277(7)$ кВт·ч.
1 кВт·ч = 3 600 000 Дж $\approx 859\,845$ калории.
1 кВт·с = 1 000 Дж.
1 Дж $\approx 0,238846$ калории.
1 калория = 4,1868 Дж
1 термохимическая калория = 4,1840 Дж.

Примеры:

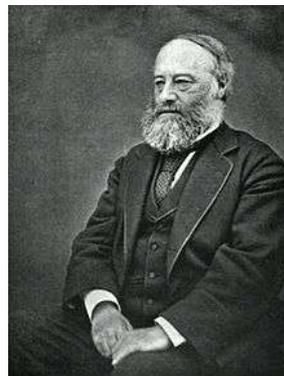
Тепловая энергия, соответствующая температуре 1 К: $1,380 \cdot 10^{-23}$ Дж
Энергия фотона красного видимого света: $2,61 \cdot 10^{-19}$ Дж
Энергия Ферми металлического золота: $8,8 \cdot 10^{-19}$ Дж
Атомная единица энергии (энергия Хартри): $4,360 \cdot 10^{-18}$ Дж
Энергия, выделяемая при взрыве 1 тонны тринитротолуола (тротилловый эквивалент): $4,184 \cdot 10^9$ Дж
Энергия, выделенная при атомной бомбардировке Хиросимы: около $6 \cdot 10^{13}$ Дж

Джеймс Прескотт Джоуль

Первые работы Джеймса Джоуля, относящиеся к [1838—1840 годам](#), касаются исследования законов электромагнетизма. Изыскивая лучшие способы измерения электрических токов, Джеймс Джоуль в 1841 году открыл названный его именем закон, дающий зависимость между [силой тока](#) и выделенным этим током в проводнике теплом ([Закон Джоуля — Ленца](#))

Джоуль изучал природу тепла, и обнаружил её связь с механической работой. Это привело к теории сохранения энергии, что в свою очередь привело к разработке первого закона термодинамики.

Он работал с лордом Кельвином над абсолютной шкалой температуры, делал наблюдения над магнитострикцией.



24.12.1818 -11.10.1889

Материал из Википедии

16

ЭЛЕКТРОНВОЛЬТ

Электронво́льт (сокращённо **эВ** или **eV**) — внесистемная **единица измерения энергии**, широко используемая в атомной и квантовой физике.

Один электронвольт равен энергии, которая необходима для переноса электрона в электростатическом поле между точками с разницей потенциалов 1 В (вольт).

Так как работа при переносе заряда q равна qU (где U — разность потенциалов), а заряд электрона составляет [−1,602 176 487\(40\)×10^{−19} Кл](#), то

$$1 \text{ эВ} = 1,602\,176\,487(40) \times 10^{-19} \text{ Дж} = 1,602\,176\,487(40) \times 10^{-12} \text{ эрг}$$

Как правило, через электронвольт выражается и **масса элементарных частиц** (исходя из эквивалентности массы и энергии, $E = mc^2$). $1 \text{ эВ}/c^2 = 1,782\,661\,758(44) \cdot 10^{-36} \text{ кг}$, и напротив, $1 \text{ кг} = 5,609\,589\,12(14) \cdot 10^{35} \text{ эВ}/c^2$. 1 атомная единица массы равна 931,4 МэВ/ c^2

В температурных единицах 1 эВ соответствует 11 604,505(20) Кельвин

В химии часто используется молярный эквивалент электронвольта. Если один **моль** электронов перенесён между точками с разностью потенциалов 1 В, он приобретает (или теряет) энергию 96 485,3383(83) Дж, равную произведению 1 эВ на **число Авогадро**. Эта величина численно равна **постоянной Фарадея**

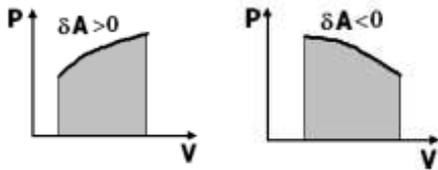
17

Работа в термодинамике определяется произведением действующей силы на путь ее действия. Так работа против сил внешнего давления есть работа расширения

$$\delta A = p \int_F dF dn \quad \text{или} \quad \delta A = p dV, \quad \text{Дж} \quad (3)$$

теплота и работа – энергетические характеристики процессов теплового и механического взаимодействия системы с окружающей средой

если $dV < 0$ – работа совершается над телом



а

б

тело расширяется

тело сжимается

В термодинамике для исследования равновесных процессов широко используют диаграмму, в которой осью абсцисс служит удельный объем. Состояние тела на этой диаграмме изображается точкой

теплота и работа – энергетические характеристики процессов теплового и механического взаимодействия системы с окружающей средой.

18

Отношение количества теплоты, полученного телом при бесконечно малом изменении его состояния, к связанному с этим изменению температуры называется **полной теплоемкостью** тела в данном процессе

$$C = \delta Q_T / dT \quad (4)$$

Обычно величину теплоемкости относят к единице количества вещества и в зависимости от принятой единицы измерения *различают*

1. **удельную массовую теплоемкость**, отнесенную к 1 кг и измеряемую в Дж/(кг.К); c
2. **удельную объемную теплоемкость**, отнесенную к количеству вещества, содержащемуся в 1 м³ объема при нормальных физических условиях и измеряемую в c' Дж/(м³.К);
3. **удельную мольную теплоемкость**, отнесенную к одному киломолю и измеряемую в Дж/(кмоль.К). μc

$$c = \mu c / \mu; \quad c' = \mu c / 22,4; \quad c' = c \rho \quad (5)$$

22,4 м³ – объем одного киломоля

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 тело в зависимости от процесса (или в зависимости от условий) требует для своего нагревания на 1 градус различного количества теплоты.

Теплоемкость и есть такое количество тепла, которое в данных условиях требуется для изменения температуры тела на один градус.

19

В термодинамических расчетах большое значение имеют *теплоемкость при постоянном давлении*

$$c_p = \delta q_\tau / dT_p \quad (6)$$

и *теплоемкость при постоянном объеме*

$$c_v = \delta q_\tau / dT_v \quad (7)$$

для удельных величин

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

$$\Rightarrow \delta q_\tau = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T dv + p dv \quad (9)$$

Для изохорного процесса $v = const$ $\delta q_\tau = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT$ (10)

$$c_v = \delta q_\tau / dT_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad (11)$$

В изобарном процессе $p = const$

$$\delta q_\tau / dT_p = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v + \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + p \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \quad (12)$$

$$c_p = c_v + \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + p \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \quad (13)$$

энтальпия $H = U + pV$ или $h = u + pv$ (измеряется в джоулях или джоулях на кг)

$$dh = du + pdv + vdp \quad \longrightarrow \quad \delta q_\tau = dh - vdp \quad \longrightarrow$$

$$c_p = \delta q_\tau / dT_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad (15)$$

20

Примеры:

| вещество | теплоемкость, c_p , Дж/(кг·К) | плотность, ρ , кг/м ³ |
|---------------------|------------------------------------|--|
| алюминий | 896 | 2702 |
| вольфрам | 134 | 19300 |
| железо | 452 | 7870 |
| медь | 383 | 8933 |
| никель | 446 | 8900 |
| платина | 133 | 21450 |
| тантал | 138 | 16600 |
| хром | 440 | 7160 |
| цирконий | 272 | 6570 |
| дюралюминий | 833 | 2787 |
| алюминиевая бронза | 410 | 8666 |
| асбест | 816 | 383 |
| бетон | 837 | 500 |
| гранит | | 2750 |
| дуб | 2390 | 609-801 |
| кирпич магнезитовый | | 2000 |
| кирпич строительный | 837 | 1700 |
| плексиглас | | 1180 |
| пробка | 1880 | 150 |
| стекло оконное | 800 | 2800 |
| уголь, антрацит | 1260 | 1370 |

21

Кельвин (обозначение: **К**) — единица измерения температуры в СИ, предложена в 1848 году

Один кельвин равен $1/273,16$ термодинамической температуры тройной точки воды. Начало шкалы (0 К) совпадает с абсолютным нулем. Пересчет в градусы Цельсия: $^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273,15$ (температура тройной точки воды — $0,01^{\circ}\text{C}$).

В 2005 г. определение кельвина было уточнено.

Консультативный комитет по термометрии установил требования к изотопному составу воды при реализации температуры тройной точки воды.

Международный комитет мер и весов собирается в **2011** году изменить определение кельвина, чтобы избавиться от трудновоспроизводимых условий тройной точки воды. В новом определении кельвин будет выражен через секунду и значение постоянной Больцмана

$$k = R/N_A = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$$

Единица названа в честь английского физика Уильяма Томсона, которому было пожаловано звание лорд Кельвин Паргский из Айршира. В свою очередь, это звание пошло от реки Кельвин ([River Kelvin](#)), протекающей через территорию университета в Глазго.

До 1968 года кельвин официально именовался *градусом Кельвина*

22

Материал из Википедии

Один из величайших физиков. Предки Томсона были ирландские фермеры; отец его Джеймс Томсон (1776—1849), известный математик, был с 1814 г. учителем в Belfast Academical Institution, затем с 1832 г. профессор математики в Глазго; известен учебниками по математике, выдержавшими десятки изданий. Уильям Томсон вместе со старшим братом, Джеймсом учились в колледже в Глазго, а затем в St. Peter College в Кембридже, в котором Томсон закончил курс наук в 1845 г.

В 1846 г. **двадцатидвухлетний** Томсон занял кафедру теоретической физики в университете в Глазго. Необыкновенные заслуги Томсона в чистой и прикладной науке были вполне оценены его современниками.

В 1866 г. Томсон возведён в дворянское достоинство, в 1892 г. королева Виктория пожаловала ему пэрство с титулом «барон Кельвин».

Лишь некоторые предметы его работ: термодинамические исследования, приведшие кроме того ещё к установлению абсолютной шкалы температур; работы по гидродинамике и теории волн (награждены в 1887 г. премией от эдинбургского королевского общества); работы по термоэлектричеству, приведшие к открытию так наз. «**эффекта Томсона**» — переноса тепла электрическим током; исследования по теории упругости (**1862—1863**), в которых Томсон расширяет теорию шаровых функций; работы по динамической геологии.

Не менее замечательна деятельность Томсона в практической деятельности; ему принадлежит **изобретение или улучшение многих инструментов**, вошедших во всеобщее употребление в науке и технике. Томсону Англия обязана блестящим состоянием в высших школах её математической физики.

**Уильям Томсон
(лорд Кельвин)**



1824—1907

Материал из Википедии

23

МОЛЬ

Моль – количество вещества, которое содержит столько же элементарных структурных единиц, сколько содержится атомов углерода в 12 г. углерода-12.

12 грамм углерода-12 содержат такое же число атомов, что и 1 грамм. водорода. Это же справедливо для других веществ при выражении массы в граммах. Например, 4 грамма гелия и 200 грамм ртути содержат одинаковое число атомов. Это число, равное $6,022 \cdot 10^{23}$, называют постоянной Авогадро N_A . Число N_A любых структурных единиц (электронов, молекул водорода, атомов алюминия) называем молем.

Массы атомов: $10^{-24} - 10^{-22}$ грамм. Относительная атомная масса 1) = масса одного атома элемента/масса одного атома водорода;
2) = масса одного атома элемента/(1/12) массы одного атома углерода-12

Различие невелико – для углерода в углеродной шкале имеем отн. а.м. - 12,0000, для водорода – 1,0078.

Аналогично определяется относительная молекулярная масса

$$\text{Количество вещества (число моль)} = \frac{\text{масса}}{\text{молекулярная масса}}$$

24

Уравнения первого закона термодинамики мы можем представить в иной форме

$$q = p \frac{dv}{dt} + \frac{du}{dt} \qquad q = \frac{dh}{dt} - v \frac{dp}{dt} \qquad \longrightarrow \qquad (16)$$

$$c_v \frac{dT}{dt} = \left(\frac{du}{dt} \right)_v \qquad c_p \frac{dT}{dt} = \left(\frac{dh}{dt} \right)_p \qquad (17)$$

Разность $c_p - c_v \frac{m\Delta T}{p\Delta V}$ по определению равна работе внешнего давления по изменению объема $p\Delta V$
 m - масса сжимаемого вещества в объеме ΔV

Второй закон термодинамики устанавливает существование такой термодинамической функции состояния как энтропия, так что для равновесных процессов

$$\delta Q_\tau = T ds \qquad \delta q_\tau = T ds \qquad (18)$$
$$T \frac{ds}{dt} = p \frac{dv}{dt} + \frac{du}{dt} \qquad T \frac{ds}{dt} = \frac{dh}{dt} - v \frac{dp}{dt} \qquad (19)$$

Для необратимых процессов имеем

$$T \frac{ds}{dt} > p \frac{dv}{dt} + \frac{du}{dt} \qquad T \frac{ds}{dt} > \frac{dh}{dt} - v \frac{dp}{dt} \qquad (20)$$

Второй закон термодинамики может быть сформулирован различными способами. Для необратимых процессов этот закон только устанавливает возможность и направление их протекания

Третий закон термодинамики

25

Законы классической термодинамики не могут установить, почему протекают необратимые процессы, почему все реальные процессы – необратимы. Для необратимых процессов энтропия не определяется только как функция состояния.

Для того чтобы определить скорость теплопереноса, мы должны использовать новые физические принципы, а именно ввести законы переноса, которые не являются составной частью классической термодинамики. Это, например, законы теплообмена Фурье, Ньютона, Стефана-Больцмана и др. Но очень важно помнить, что ***описание теплопереноса требует, чтобы новые (дополнительные) физические принципы не противоречили фундаментальным термодинамическим законам***

конец