

Техническая термодинамика

ЛЕКЦИИ	32 часа
ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ	8 часов
ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ	24 часа
АУДИТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ	64 часа
САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА	32 часа
ИТОГО	96 часов

Лектор – Борисов Борис Владимирович, проф. каф. ТПТ ЭНИН, д. ф.-м. н.

4 корпус ТПУ комната 49

Рабочий телефон : 564-010

Email: bvborisov@tpu.ru

Сайт: <http://portal.tpu.ru/SHARED/b/BVBORISOV/index>

<http://portal.tpu.ru:7777/SHARED/b/BVBORISOV>

Основная литература:

1. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика: учебник для вузов. – 5-ое изд., перераб. и доп. - М.: Изд. дом МЭИ, 2008. – 496 с.
2. Фукс Г.И. Техническая термодинамика. – Томск: изд. ТГУ, 1973. –460с.
3. Андрианова Т.Н. и др. Сборник задач по технической термодинамике. –М.: Энергия, 2001. –240с.
4. Практикум по технической термодинамике: Учеб. пособие для ВУЗов/В.Н. Зубарев, А.А. Александров, В.С. Охотин – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 304 с.: ил.
5. Борисов Б.В., Крайнов А.В. Практикум по технической термодинамике : учебное пособие для вузов., — Томск : Изд-во ТПУ, 2012. — 157 с.: ил. — Библиогр.: с. 111-113. — Глоссарий: с. 154-157.
6. Крайнов А.В., Борисов Б.В. Теоретические основы теплотехники : учебное пособие., — Томск : Изд-во ТПУ, 2012.
7. Голдаев С.В., Загромов Ю.А. Основы технической термодинамики ТПУ. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 224 с

Тема 1 (2 час, лекция 1)

Лекция 1

Введение

Предмет курса, его место и роль в подготовке инженеров – энергетиков. Связь с другими отраслями знаний. Основные исторические этапы становления, роль в научно – техническом прогрессе, развитии новой техники и технологии. Проблема экономии топлива – энергетических ресурсов, снижение норм расхода теплоты и топлива, использование вторичных энергоресурсов, защита окружающей среды. Использование возобновляемых источников энергии. Основные задачи курса.

Основные понятия и определения термодинамики

Техническая термодинамика как теоретическая база специальных дисциплин. **Предмет и методы термодинамики.** Термодинамическая система и окружающая среда. Теплота и работа как форма передачи энергии. Термические параметры состояния. Уравнение состояния. Идеальный газ. Уравнение состояния идеального газа. Равновесные и неравновесные процессы. Обратимые и необратимые процессы. Круговые процессы (циклы). Общие свойства параметров состояния.

Вокруг нас устройства, вырабатывающие, передающие и использующие различные виды энергии.

Многие из них носят названия «тепловых» и описываются с помощью:

Теплотехника = **Техническая термодинамика** + Теплообмен

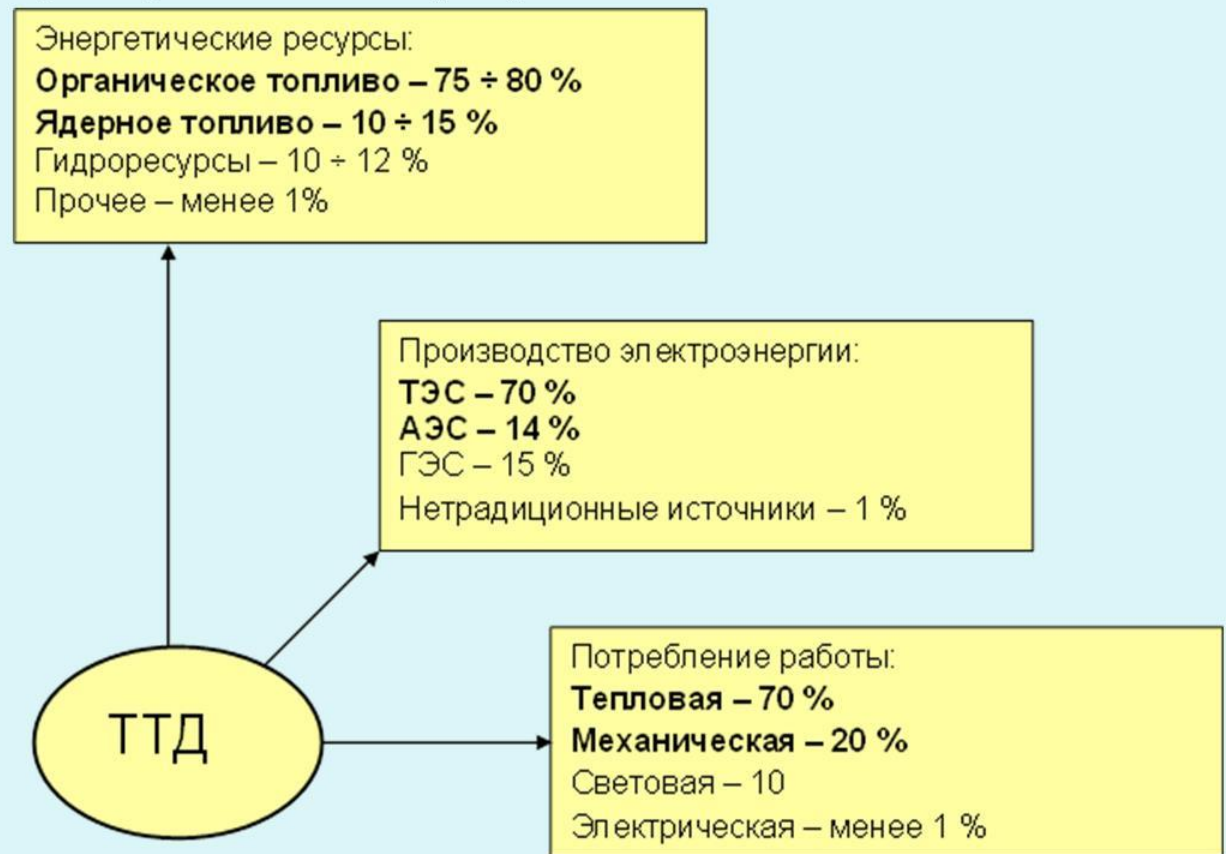
Термодинамика изучает закономерности превращения одних форм энергии в другие при использовании **теплоты и работы**

как двух путей этого превращения.

Термодинамика:

θέρμη – «тепло»

δύναμις – «сила»



Термодинамика прошла длинный путь становления понятия «теплоты»:

Большая часть этого пути пришлась на XIX век

❖ использование понятия «теплорода» и его свойств:

□ Жан Батист Жозеф **Фурье** (фр. Jean Baptiste Joseph Fourier; 21 марта 1768— 16 мая 1830), французский математик и физик – «**Аналитическая теория тепла**»



□ Николя Леона́р Сади́ **Карно́** (фр. Nicolas Léonard Sadi Carnot; 1 июня 1796 – 24 августа 1832) — французский математик и физик – «**Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу**»



От наблюдения, от практических задач –
до теоретических основ термодинамических процессов (циклов)

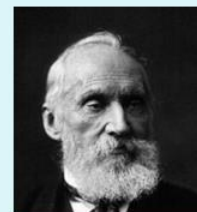
❖ Введение понятия «эквивалентности работы энергии и теплоты», отход от «теплорода» :

❑ Джеймс Прескотт Джоуль (англ. James Prescott Joule; 24.12.1818 — 11.10.1889) — английский физик, пивовар: количество теплоты, которое в состоянии нагреть 1 фунт воды на 1 градус по Фаренгейту, равно и может быть превращено в механическую силу, которая в состоянии поднять 838 фунтов на вертикальную высоту в 1 фут

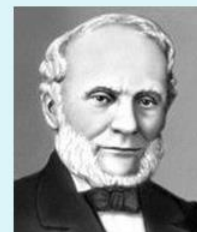


❑ Уильям Томсон, лорд Кельвин (англ. William Thomson, 1st Baron Kelvin; 26.06.1824 – 17.12.1907) — британский физик.

Большое количество работ в самых разных разделах физики и термодинамики, в частности, первая формулировка второго закона



❑ Рудольф Юлиус Эммануэль Клаузиус (нем. Rudolf Julius Emanuel Clausius, имя при рожд. — Рудольф Готтлиб (нем. Rudolf Gottlieb); 2.01.1822 — 24.08.1888) — немецкий физик, механик и математик. Большое количество работ в самых разных разделах физики и термодинамики, в частности, одна из формулировок второго закона. Отказался от «теплорода» - все движение частиц, ввел «ЭНТРОПИЮ»



❑ Михайл Васильевич Ломоносов (8.11.1711,—4.04.1765) — первый русский учёный-естествоиспытатель мирового значения, энциклопедист, химик и физик; он вошёл в науку как первый химик, который дал физической химии определение, весьма близкое к современному, и предначертал обширную программу физико-химических исследований; его молекулярно-кинетическая теория тепла во многом предвосхитила современное представление о строении материи и многие фундаментальные законы, в числе которых одно из начал термодинамики.

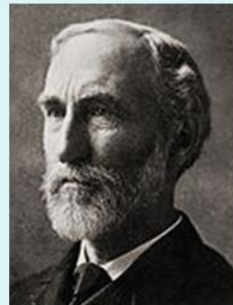


❑ Бенуа Поль Эмиль Клапейрон (26.02.1799 — 28.01.1864) — французский физик и инженер. В России был профессором в институте путей сообщения. «О внутреннем равновесии твёрдых частиц», «О движущей силе теплоты»



❖ Зарождение современной термодинамики

- ❑ **Лю́двиг Бо́льцман** (нем. Ludwig Eduard Boltzmann, 20.02.1844, — 5.09.1906) — австрийский физик-теоретик, основатель статистической механики и молекулярно-кинетической теории. Равновесноераспределения по импульсам и координатам молекул идеального газа, находящегося во внешнем потенциальном поле (распределение Больцмана). Основное уравнение микроскопической теории неравновесных процессов (физической кинетики), носящее его имя, а также установил так называемую H-теорему, выражающую закон возрастания энтропии для изолированной системы. В 1872 показал статистический характер второго начала термодинамики, связав энтропию замкнутой системы с числом возможных микросостояний, реализующих данное макросостояние. Это стало указанием на несостоятельность представления о «тепловой смерти Вселенной».
- ❑ **Джозайя Уиллард Гиббс** (англ. Josiah Willard Gibbs; 1839—1903) — американский математик, физик, физикохимик и механик, один из создателей векторного анализа, статистической физики, математической теории термодинамики, химической термодинамики. энергия Гиббса, парадокс Гиббса, правило фаз Гиббса — Гельмгольца, треугольник Гиббса — Розебома, уравнения Гиббса — Дюгема и др.
- ❑ **Герман Людвиг Фердинанд фон Гельмгольц** (нем. Hermann von Helmholtz; 31.08.1821 — 8.09.1894) — немецкий физик, врач, физиолог и психолог. В книге «О сохранении силы» (1847) он формулирует закон сохранения энергии строже и детальнее, чем Роберт Майер в 1842 году. Позже Гельмгольц формулирует законы сохранения энергии в химических процессах и вводит в 1881 году понятие свободной энергии — энергии, которую необходимо сообщить телу для приведения его в термодинамическое равновесие с окружающей средой



В XX веке Термодинамика (наука, которая изучает переходы энергии из одной формы в другую, энергетические эффекты, сопровождающие различные физико-химические процессы, возможность, направление и предел самопроизвольного протекания процессов при заданных условиях) бурно развивается в виде различных приложений в технике, энергетике, химии, биологии т.д..

Перед началом непосредственным изучением Термодинамики

ДОМА!!!

Повторить и к занятиям знать понятия, величины и единицы измерения:

Физическое тело

Моль

Координаты – скорость – ускорение

Масса

Сила - сила трения - давление

Работа

Энергия и ее виды

Термодинамическая система (термодинамическое тело) — совокупность материальных объектов, находящихся во взаимодействии, мысленно или фактически выделенные из окружающей среды.

Как понятно из только – что сказанного: все находящееся вокруг Термодинамической системы (термодинамического тела) и оказывает на нее воздействие называется **окружающей средой**.

- Термодинамика имеет дело с макроскопическими величинами, которые могут быть определены опытным путем, либо рассчитаны на основе опытных данных. При термодинамических исследованиях любого процесса не рассматривается молекулярная структура вещества, характер сил взаимодействия между частицами, механизм протекания процесса.

*Это называется **феноменологическим** подходом.*

Обусловлено: $N_A = 6,02214179 \times 10^{23} \pm 0,00000030 \times 10^{23}$ моль⁻¹ - число Авогадро

- рассматривает процессы вне зависимости от пространства и времени, не касается скорости и пути протекания процесса.

- ❖ **Гомогенные** – однородные по составу и физическим свойствам во всем объеме.
- ❖ **Гетерогенные** – состоящие из разнородных тел, отделенных друг от друга поверхностями раздела.
- ❖ **Неизолированные или изолированные** – находящиеся в энергетическом взаимодействии с внешней средой или нет.
(теплоизолированные – адиабатные)
- ❖ **Открытые или закрытые** – с проницаемыми для вещества границами или нет.
- ❖ **Термомеханические** – обмениваются с окружающими телами энергией в форме теплоты и работой.
- ❖ **Абсолютно жесткие** – ($V = const$).
- ❖ **Идеально гибкие** – ($p = const$).

Параметры состояния – любая величина, присущая телу, изменение которой определяется только начальным и конечным состоянием тела и не зависит от характера процесса изменения его состояния, при переходе тела из первого состояния во второе.

Интенсивные – которые не зависят от количества (температура, давление и т.п.);

Экстенсивные – зависящие от количества вещества, следующие закону сложения или, как говорят математики, закону аддитивности (масса, объем, внутренняя энергия и т.п.).

Термические - параметры, которые возможно измерить приборами.

Калорические параметры (энергетические или функций состояния) - получают расчетным путем и зачастую имеют единицы измерения работы (энергии) джоуль или калория.

Теплота (Q) является мерой энергии, переданной от одного тела другому за счет разницы температур этих тел. Эта форма передачи энергии связана с хаотическим столкновением молекул соприкасающихся тел. При этом молекулы более нагретого тела передают энергию молекулам менее нагретого тела. Перенос массы при этом не происходит.

Работа (A) — это мера передачи энергии от системы, совершающей работу, к системе, над которой совершается работа, или, другими словами, мера энергии, переданной от одного тела к другому, за счет перемещения масс под действием каких-либо сил. Сюда относятся: поднятие тел в поле тяготения, переход электричества от большего к меньшему потенциалу, расширение газа и т. п.

Теплота и работа зависят от пути протекания процесса, следовательно они не являются функциями состояния. Теплота и работа характеризуют способ или форму передачи энергии.

Теплоту выражают в Дж или кал. (ккал.), работу — в Дж.

Опыт Джоуля

□ количество теплоты, которое в состоянии нагреть 1 фунт воды на 1 градус по Фаренгейту, равно и может быть превращено в механическую силу, которая в состоянии поднять 838 фунтов на вертикальную высоту в 1 фут

1 ккал = 4,187 кДж;

1 кВт·ч = 3600 кДж = 860 ккал.

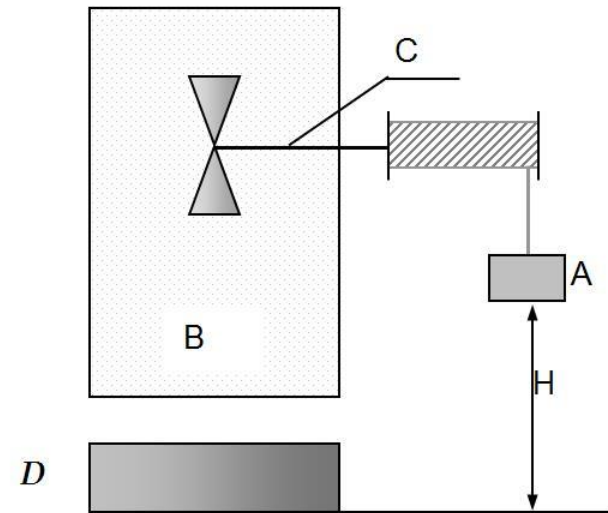


Схема установки опыта Джоуля:
A – груз; B – газ в жестком сосуде;
C – механическая мешалка;
D – горячее тело

Термические параметры

(удельный объем, давлением и температура)

Удельный объем – это объем единицы массы вещества ($\text{м}^3/\text{кг}$):

$$v = \frac{V}{m}$$

Плотность ($\text{кг}/\text{м}^3$):

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v}$$

В практике - *удельный вес* (вес единицы объема тела, $\text{Н}/\text{м}^3$):

$$\gamma = \frac{mg}{V} = \rho g$$

Давление - величина, характеризующая интенсивность сил действующих на поверхность тела по направлениям, перпендикулярным к этой поверхности.

В СИ используется единица давления паскаль (Па): $1 \text{ Па} = \text{Н/м}^2$.

$$p = \frac{F}{S}$$

Атмосферное давление воздуха над поверхностью Земли
приблизительно равно одному бару

$$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па} = 750 \text{ мм рт. ст.}$$

$$1 \text{ мм вод. ст.} = 9,81 \text{ Па};$$

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 1 \text{ торр} = 133,37 \text{ Па.}$$

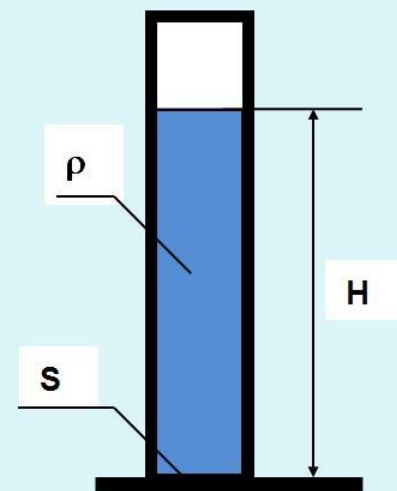
$$p = \rho g H = \gamma H$$

техническая атмосфера - ат
стандартная атмосфера - атм

$$1 \text{ кгс/см}^2 = 1 \text{ ат} = 10 \text{ м вод. ст.} = 98066,5 \text{ Па} = 735,6 \text{ мм рт. ст.}$$

$$1 \text{ атм (физ. атм)} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 101,325 \text{ кПа}$$

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2 = 1,02 \cdot 10^{-5} \text{ кгс/см}^2 = 0,102 \text{ кгс/м}^2 = 0,102 \text{ мм вод. ст.}$$



Абсолютное давление p - сумма избыточного p_M и атмосферного давлений B . Это давление отсчитывают от нуля (полного вакуума).

Единица абсолютного давления «ата».

Избыточное давление (манометрическим) - давление в сосуде, без учёта давления окружающей среды (атмосферы).

Единица избыточного давления «ати».

Средства измерений давления подразделяются на:

- **манометры** - приборы, измеряющие избыточное давление $p = p_M + B$;
- **вакуумметры** - приборы, измеряющие давление ниже атмосферного (разреженное состояние газов) $p = B - p_B$;
- **мановакуумметры** - приборы, измеряющие как избыточное давление так и разрежение (измеряют абсолютное давление). Приборы имеют шкалу с нулем посередине.
- **напоромеры** - приборы, измеряющие низкие величины избыточных давлений примерно 25 кПа (2500 мм вод.ст.);
- **тягомеры** - приборы, измеряющие малые разрежения до 25 кПа (2500 мм вод. ст.);
- **тягонапоромеры** - приборы, измеряющие как давление, так и разрежение. Приборы имеют шкалу с нулем посередине.

При определении атмосферного давления с помощью ртутного барометра его показания приводятся к 0°C исходя из соотношения

$$B_0 = B (1 - 0,000172 \cdot t)$$

B – действительная высота ртутного столба барометра при температуре ртути $t^{\circ}\text{C}$;

B_0 – показания барометра, приведенные к температуре 0°C .

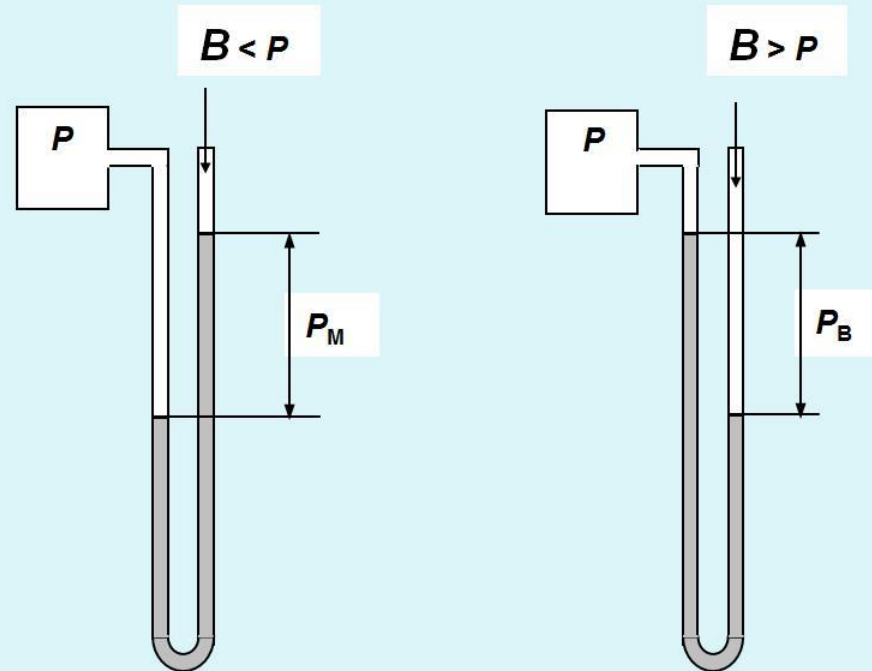
- манометры - $p = p_M + B$
- вакуумметры - $p = B - p_B$

Нормальные условия (НУ)

760 мм рт. ст.;

0°C ;

22,4 л/моль.



Физическая сущность давления и температуры

Моль — количество вещества, которое содержит столько же структурных элементов, сколько атомов содержится в 12 г ^{12}C .

Структурными элементами обычно являются атомы, молекулы, ионы и др.

Масса 1 моль вещества, выраженная в граммах, численно равна его молекулярной массе.

В СИ - киломоль

$$p = \frac{1}{3} N_0 m \overline{w^2} = \frac{2}{3} N_0 \frac{m \overline{w^2}}{2} = \frac{2}{3} \nu_0 \cdot N_A \frac{m \overline{w^2}}{2} = \frac{2}{3} \nu_0 \cdot N_A E_k$$

N_0 – число молекул в 1 м³ газа ; ν_0 – число молей в 1 м³ газа ;

m – масса одной молекулы, кг;

\overline{w} – средняя квадратичная скорость поступательного движения молекул, м/с.

Понятие температуры и температурной шкалы

Распльвчатое :«температура – это степень *нагретости* тела»:

Температура – представляет собой меру нагретости тел и определяет направление перехода тепловой энергии (теплоты). Теплота переходит от тела с более высокой температурой к телу с более низкой температурой. Этот процесс энергетического обмена будет самопроизвольно протекать до полного выравнивания температур обоих тел. При этом у первого тела температура будет уменьшаться, а у второго – увеличиваться до установления термического равновесия.

Термодинамика: «температура» - параметр идеальной обратимой тепловой машины, не зависящего от рабочего вещества.

Температура тесно связано с усредненной кинетической энергией частиц. Однако, энергия теплового движения частиц очень мала по сравнению с джоулем, поэтому использование этой величины оказывается неудобным. Тепловое движение измеряется в других единицах, которые получаются из джоулей посредством переводного коэффициента «*k*»

$$E_k = (3/2) k T \qquad p = (2/3) N_0 E_k$$

Рекомендуемое значение постоянной Больцмана в настоящее время (CODATA 2002):

$$\bullet k = 1,380\,650\,5 \times 10^{-23} \text{ Дж/К} \text{ с относительной неопределенностью } 1.8 \times 10^{-6}$$

В 1954 г. МКМВ принял резолюцию о переходе на новое определение кельвина, никак не связанное с интервалом 0 -100 °С.

Оно фактически закрепило за **тройной точкой воды** значение **273,16 К (0,01 °С)**

и

«пустило в свободное плаванье» около 100 °С точку кипения воды.

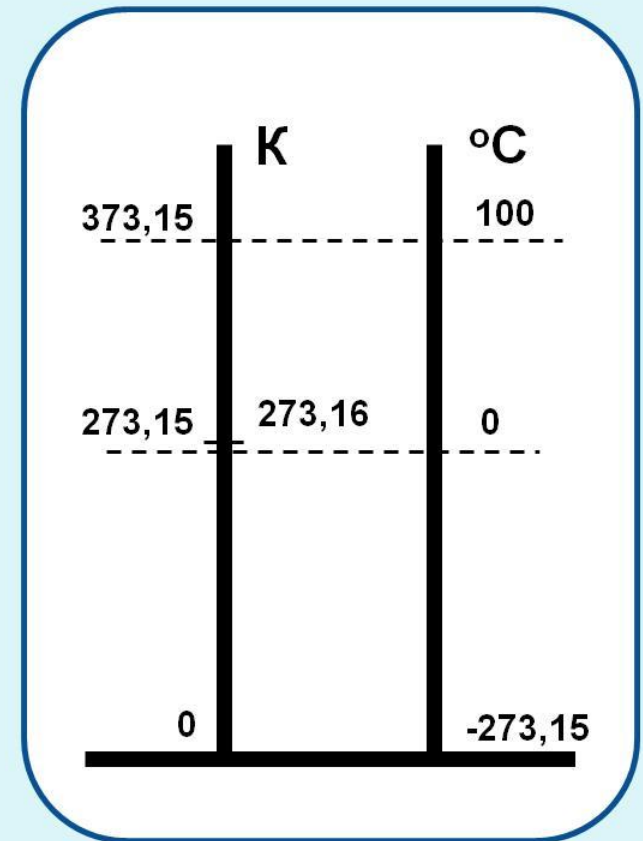
Вместо «градуса Кельвина» для единицы температуры - просто «кельвин».

$$T = t + 273,15$$

$$F = 1,8 \cdot t + 32$$

Для термометра имеет значение следующее:

1. Термометрическое тело, обладающее термометрическим свойством;
2. Измерение производится при термическом равновесии;
3. Градус приводится в соответствии со 100 – градусной шкалой Цельсия (Кельвина).



Уравнение состояния – уравнение выражающее связь между параметрами **всех возможных равновесных состояний** термодинамической системы. (описывают термодинамическую поверхность)

в неявной форме $f(p, v, T) = 0$,

в явной форме $p = F(v, T)$; $v = f(p, T)$; $T = j(p, v)$

Термодинамически равновесное состояние тела или системы – это такое состояние теплового и механического равновесий элементов тела или системы, которое **без внешнего воздействия может сохраняться сколь угодно долго.**

Равновесная система – это система тел, находящихся в термодинамическом равновесии, в противном случае она будет называться неравновесной системой.

термодинамическое равновесие =

термическое ($T = \text{idem}$) +

механическое (при пренебрежении гравитацией $p = \text{idem}$)

Идеальный газ – газ, в котором силы взаимодействия между молекулами на расстоянии и размер самих молекул пренебрежимо малы.

$$p = \frac{2}{3} \nu_0 \cdot N_A \frac{m \bar{w}^2}{2} = \frac{2}{3} \nu_0 \cdot N_A E_k;$$

$$E_k = \frac{3}{2} kT$$

$$pV = \frac{2}{3} \nu_0 V \cdot N_A E_k$$

$$pV = \frac{2}{3} \nu_0 V \cdot N_A \cdot \frac{3}{2} kT$$

$$pV = \nu \cdot N_A \cdot kT = \nu \cdot R_\mu T$$

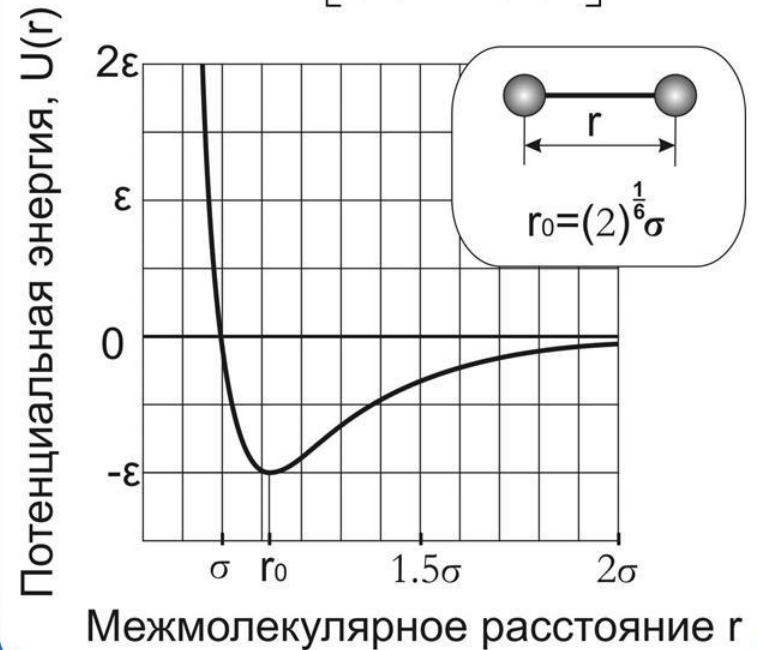
$$N_A \cdot k = R (\mu R \text{ или } R_\mu)$$

R часто в энергетике μR или R_μ

$$R_\mu = \frac{p_0 \cdot V_{\mu 0}}{T_0} = \frac{101325 \cdot 22,4}{273,15} = 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$$

Потенциал Леннарда-Джонса

$$U(r) = 4\varepsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right]$$



Уравнение состояния идеального газа было получено Клапейроном для одного килограмма газа, а Менделеевым для одного моля газа.

ДОМА:

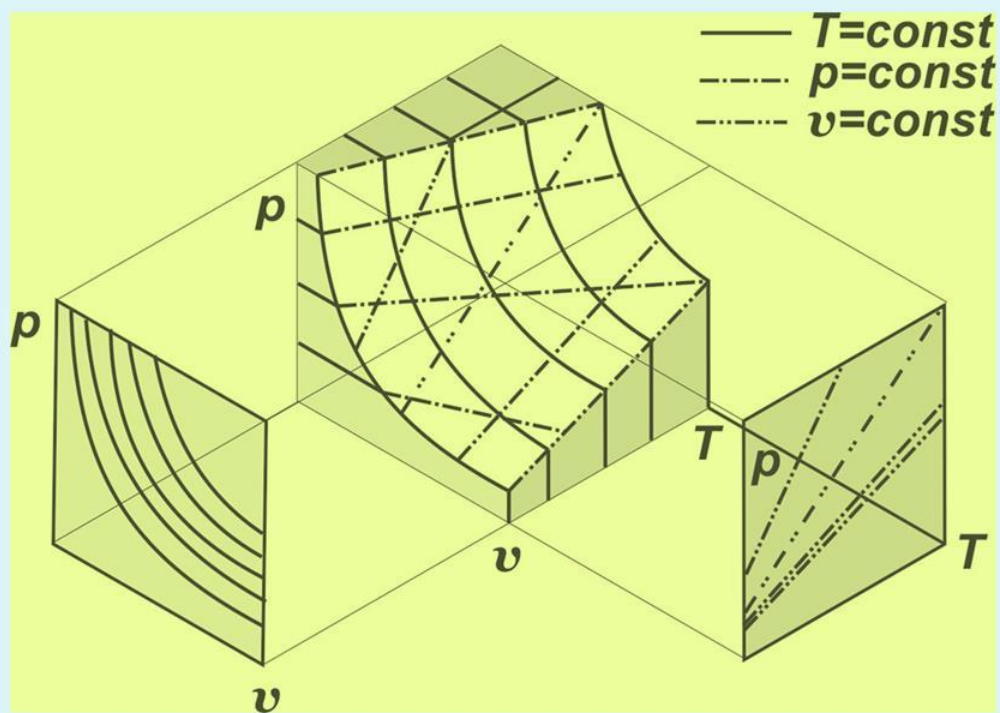
**Разобрать разновидности уравнения
Менделеева – Клапейрона**

И ВСПОМНИТЬ

закон Бойля – Мариотта для $T=const$: $p v = const$,

закон Гей – Люссака для $p=const$: $v/T = const$,

закон Шарля для $v=const$: $T/p = const$.



$$pV = \nu \cdot R_{\mu} \cdot T \Rightarrow \left| \nu = 1; V_{\mu} \right| \Rightarrow pV_{\mu} = R_{\mu} \cdot T$$

$$V_{\mu \text{ НУ}} = 22.4 \left(\frac{\text{л}}{\text{моль}} \text{ или } \frac{\text{м}^3}{\text{кмоль}} \right)$$

$$\nu = \frac{m}{\mu} \Rightarrow pV = m \frac{R_{\mu}}{\mu} T \Rightarrow \left| R = \frac{R_{\mu}}{\mu}; \right| \Rightarrow pV = mRT;$$

$$\frac{V}{m} = \nu = \frac{1}{\rho}; \quad V_{\mu} = R_{\mu}$$

$$p\nu = RT; \quad p = \rho RT.$$

V_{μ}, R_{μ} — соответственно, молярный объем ($\text{м}^3/\text{кмоль}$) и молярная или универсальная газовая постоянная $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} \right)$

R — газовая или удельная газовая постоянная $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right)$

Термодинамический процесс

Нулевое начало. Система никогда не может самопроизвольно (без внешнего влияния) выйти из равновесного состояния.

Термодинамический процесс - процесс изменения состояния термодинамического тела (системы), не находящегося в термодинамическом равновесии с внешней средой и не изолированного от нее. При этом наблюдается энергетическое взаимодействие между телом и окружающей средой, сопровождающееся изменением параметров тела.

Чаще всего равновесный – медленный с мгновенным выравниванием термодинамических параметров по всей системе и представляется как цепочка промежуточных равновесных термодинамических состояний, которые на графике сливаются в непрерывную практически плавную линию.

В этом случае каждое промежуточное состояние соответствует уравнению состояния системы.

$$\frac{da}{dt} \ll \frac{\Delta a}{\tau}; \quad a - \text{параметр, } t - \text{время; } \tau - \text{время релаксации.}$$

Особым образом описываются неравновесные процессы. Но и для них в некоторых случаях возможно использование уравнения состояния, которое описывает в этом случае не все, а только малые части термодинамической системы, где процессы релаксации протекают достаточно быстро.

Обратимые и необратимые процессы

Обратимыми - процессы, которые могут быть проведены в прямом и обратном направлениях таким образом, что все тела, участвующие в процессе, проходят через одни и те же промежуточные равновесные состояния (но в обратной последовательности) и достигают начального состояния.

Совокупность проведения прямого и обратного обратимых процессов не производит в окружающей среде никаких изменений.

После проведения прямого и обратного обратимых процессов все тела закрытой изолированной системы возвращаются в первоначальное состояние, и, следовательно, распределение энергии между ними оказывается прежним.

Все неравновесные процессы необратимы.

Трение, теплопередача, дросселирование, расширение в пустоту...

внешняя необратимость - разность температур при теплообмене между телами;
внутренняя необратимость - трение

Процесс или цепочка процессов, после которых тело периодически возвращается в начальное состояние – **крутовым процессом** или **циклом**

Основные свойства термодинамических параметров и функций

$$\varphi(x, y, z) = 0$$

$$z = z(x, y,)$$

$$\Delta z_{12} = z_2(x_2, y_2) - z_1(x_1, y_1) = \int_1^2 dz$$

$$\oint dz = 0$$

$$dz = \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)_y dx + \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)_x dy$$

$$z = \text{const}$$

$$\left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)_y dx_z + \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)_x dy_z = 0$$

$$\left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)_x \left(\frac{\partial x}{\partial z} \right)_y \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_z = -1$$

$$\left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)_y dx_z = - \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)_x dy_z$$

Термические коэффициенты

Взаимосвязь свойств однородного вещества в равновесном состоянии характеризуется термическими коэффициентами. Эти коэффициенты могут быть определены опытным путем, они имеют определенный физический смысл.

$$p = F(v, T) = \text{const}$$

$$dp = \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_T dv_p + \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dT_p = 0 \quad \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v = - \frac{\left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p}{\left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T}$$

к. изотермической сжимаемости $\mu = -\frac{1}{v_0} \left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_T$

к. изобарного расширения (изобарного термического расширения) $\beta = \frac{1}{v_0} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P$

к. упругости $\alpha = \frac{1}{p_0} \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v$

$$\alpha = \frac{\beta}{\mu \cdot p_0}$$