

Теплотехника изучает методы получения, преобразования, передачи и использования теплоты и связанных с этим аппаратов и устройств

## Термодинамика

### Общая термодинамика

Изучает процессы превращения энергии в твердых, жидких и газообразных телах, излучение тел, магнитные и электрические явления. Устанавливает математические зависимости между термодинамическими величинами

### Техническая термодинамика

Изучает закономерности превращения энергии в тепловых двигателях, холодильных машинах. Рассматривает круг вопросов, связанных с термомеханической системой (сжатие и расширение газов, паров, возможности фазового перехода, термодинамику потока).

### Химическая термодинамика

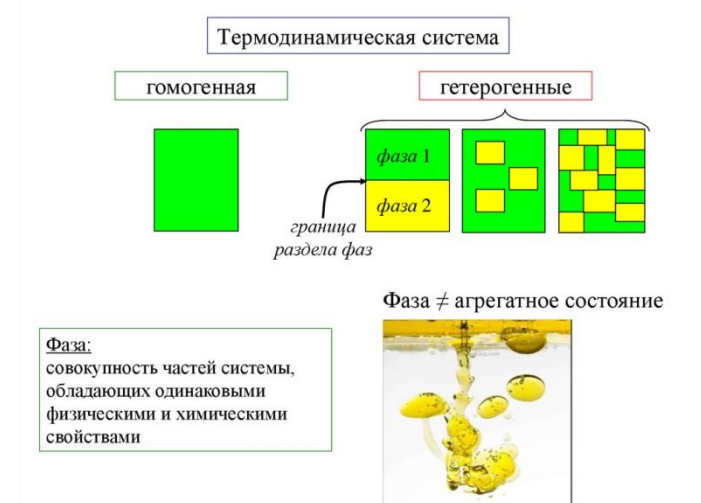
Изучает закономерности превращения энергии при изменении химического состава объектов

# Термодинамическая система



- Совокупность макроскопических тел, обменивающихся энергией и/или веществом как друг с другом, так и с окружающей средой

- Открытая и закрытая системы
- Изолированная (замкнутая) система
- Адиабатная система
- Гомогенная и гетерогенная
- Однородная – во всех частях которой свойства одинаковые; неоднородная



# Термодинамические параметры

- - величины, характеризующие состояние термодинамической системы
- $p, T, V, U, I, S$  и др.
- Параметры:
  - интенсивные – не зависят от массы системы
  - экстенсивные - зависят

## К основным параметрам относятся

- Абсолютное давление ( $p$ , Па) – средний результат ударов молекул газа, находящихся в непрерывном хаотическом движении, о стенки сосуда, в котором заключен газ

$[p]=\text{Па}$  в системе СИ; 1 бар= $10^5$  Па; 1 мм рт.ст.=133,3 Па; 1 мм вод.ст.= 9,8067 Па; 1 атм= $1,033 \text{ кг/см}^2=1,013 \cdot 10^5$  Па

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{бар}} + P_{\text{изб}}; \quad P_{\text{абс}} = P_{\text{бар}} - P_{\text{вак}};$$

- Абсолютная температура ( $T$ , К) – физическая величина, характеризующая интенсивность теплового движения молекул в состоянии термодинамического равновесия системы (мера степени нагретости тела)  $T = t^{\circ} + 273,15$  ;
- Удельный объем ( $v$ , м<sup>3</sup>/кг) – объем, занимаемый единицей массы вещества; плотность ( $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>)

# Термодинамический процесс

- - изменение состояния системы, характеризующееся изменением ее термодинамических параметров

$F(p, v, T)=0$  – уравнение состояния

- Равновесные и неравновесные процессы
- Круговые процессы – циклы
- **Равновесный процесс** – проходящий через ряд равновесных состояний
- **Равновесное состояние** – при котором во всех точках его объема давление, температура, плотность и все другие физические свойства одинаковы

# Теплота и работа

- Мерой движения материи является энергия
- При протекании термодинамического процесса тела обмениваются между собой энергией.

- Передача энергии может происходить 2-ми способами:
- I способ –
  - при непосредственном контакте тел, имеющих различную температуру путем обмена кинетической энергией между молекулами соприкасающихся тел
  - либо лучистым переносом внутренней энергии излучаемых тел путем электромагнитных волн
- Энергия передается от более нагретых тел к менее нагретым
- Количество энергии называют **количество теплоты**
- Способ передачи энергии **в форме теплоты**
  - $Q = [\text{Дж}]; q = [\text{Дж/кг}]$
- Отведенная (отнятая) и подведенная (сообщаемая)

- II способ – связан с наличием силовых полей или внешнего давления. Для передачи энергии тело должно
  - либо передвигаться в силовом поле
  - либо изменять свой объем под действием внешнего давления
- Количество переданной энергии называют **работой**
- Способ передачи энергии **в форме работы**
  - $L = [\text{Дж}]; l = [\text{Дж/кг}]$
- Затраченная (совершенная телом работа, отданная) и совершенная над телом (полученная телом)



- В общем случае передача энергии
  - в форме теплоты и
  - в форме работы

может происходить одновременно

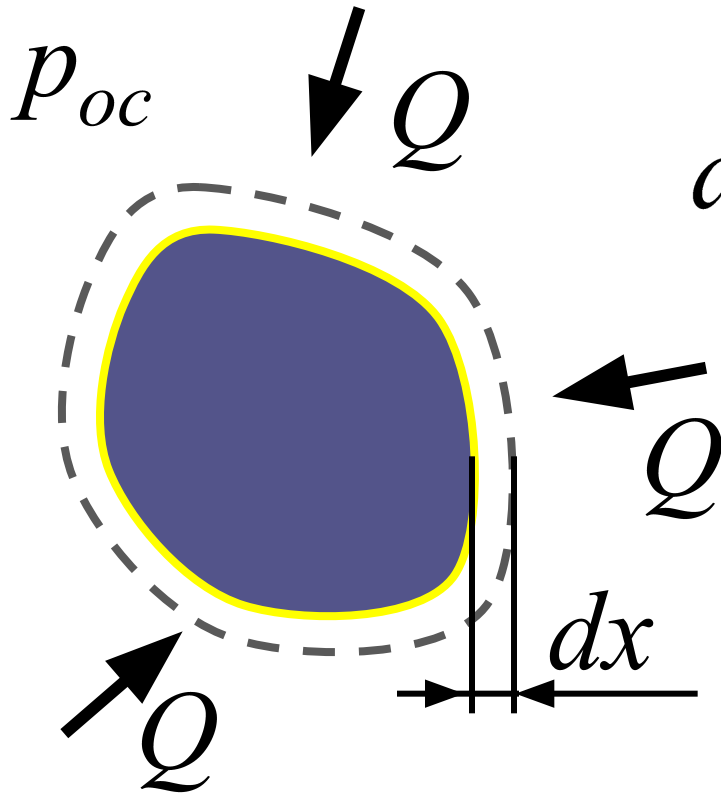
- Теплота и работа характеризуют качественно и количественно 2-е различные формы передачи энергии
- **Работа** – макрофизическая форма передачи энергии
- **Теплота** – совокупность микрофизических процессов
- Обе зависят от условий перехода тела из начального в конечное состояние, т.е. от характера процесса
- Понятия теплота и работа возникают только в связи с протеканием процесса
- **Нет процесса - нет теплоты и работы**
- **Нет запаса теплоты и работы**

**Внутренняя энергия**  $U$  (Дж) – часть энергии термодинамической системы, которая не связана с положением системы в поле внешних сил и ее движением относительно тел окружающей среды.

Внутренняя энергия выделенного объема складывается из энергии поступательного и вращательного движения молекул, составляющих минералы, энергии внутримолекулярных колебаний, потенциальной энергии сил взаимодействия между молекулами.

Внутренняя энергия термодинамической системы зависит только от параметров состояния и не зависит от того, каким путем были достигнуты эти параметры

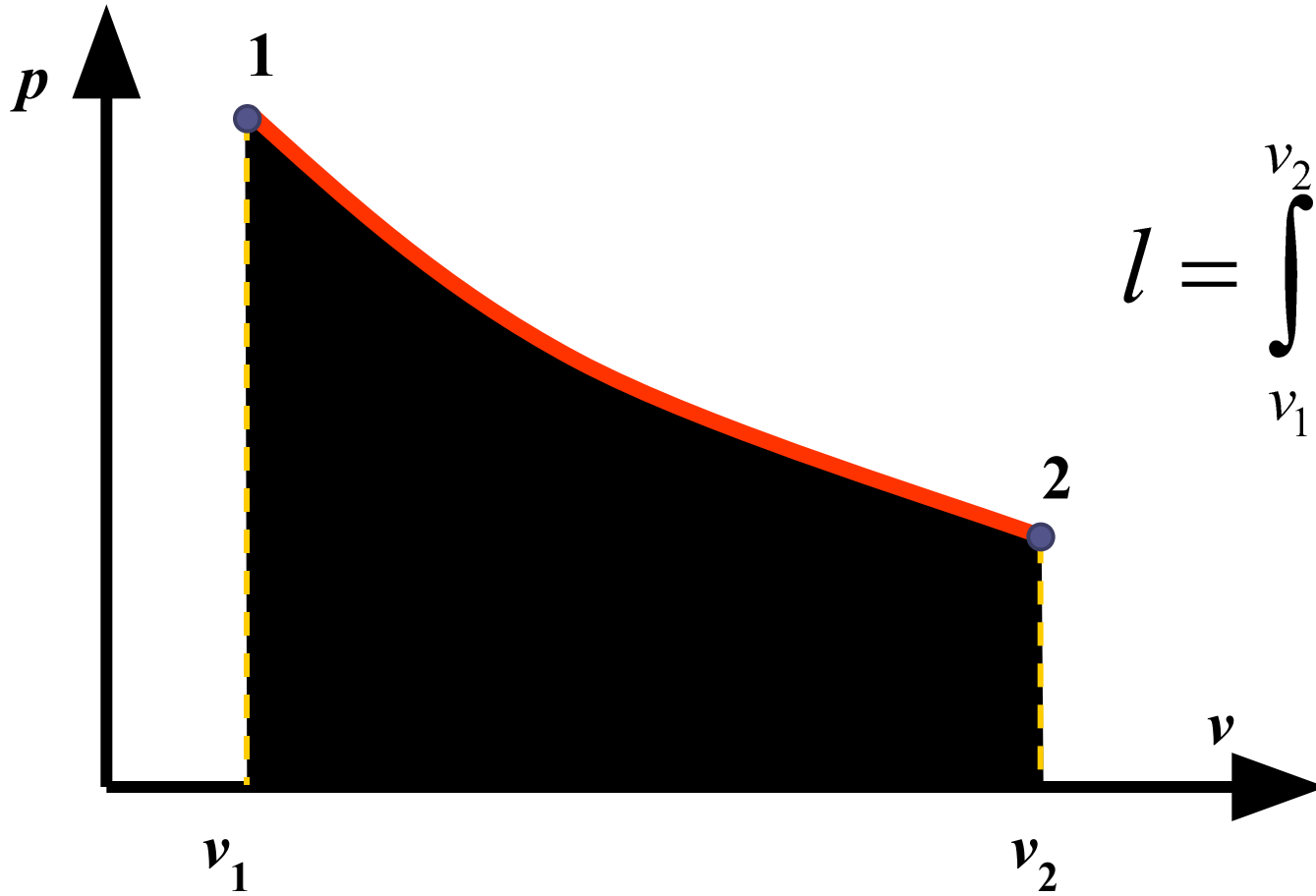
# Работа расширения системы



$$dL = p_{oc} F dx = p_{oc} dV$$

$$L = \int_{V_1}^{V_2} p_{oc} dV = \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p_{oc} dv = \int_{v_1}^{v_2} p dv$$



## I закон термодинамики

Характеризует количественную сторону процессов передачи энергии и является законом сохранения энергии, записанным в термодинамических терминах.

В общем случае при подводе теплоты к телу повышается температура тела и увеличивается его объем.

**Подведенная к телу теплота расходуется на увеличение внутренней энергии тела (повышение температуры) и совершение работы (увеличение объема)**

$$Q_{1-2} = (U_2 - U_1) + L_{1-2} = \Delta U + \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

$$q = \Delta u + \int_{v_1}^{v_2} p dv$$

при  $v = \text{const}$      $q_v = \Delta u = u_2 - u_1$

# Формулировки первого закона термодинамики

- ✓ **Невозможно возникновение или уничтожение энергии**
- ✓ **Любая форма движения способна и должна превращаться в любую другую форму движения**
- ✓ **Вечный двигатель первого рода невозможен (нельзя получить работу не затратив энергию)**

## Формулировки первого закона термодинамики

- ✓ **Энергия является однозначной функцией состояния**
- ✓ **Теплота и работа являются двумя единственно возможными формами превращения энергии**
- ✓ **Сумма всех видов энергии в любой изолированной системе является величиной постоянной**



# Энтальпия

- Физик Гиббс ввел в практику тепловых расчетов новую функцию, которая в последствии была названа энтальпией

- $I = U + pV$ , Дж

- Энтальпия (теплосодержание) – функция состояния термодинамической системы, равная сумме внутренней энергии и произведения давления в системе на ее объем

- $i = u + pv$ , Дж/кг

- 1 закон термодинамики  $dq = du + pdv$

- $dq = du + p dv + v dp - v dp$

- $dq = du + d(pv) - v dp$

- $dq = d(u + pv) - v dp$

- $dq = di - v dp$

- $dq = di + l'$

# Теплоемкость термодинамической системы

- - это отношение количества теплоты, подводимого к веществу или отводимого от вещества, к изменению температуры вещества

$$C_x = \frac{dQ}{dT} = \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \right] = -\infty \div +\infty$$

- Зависит от характера (пути) процесса

- Наиболее часто используется теплоемкость не всей системы, а единицы количества вещества – удельная теплоемкость:

- -массовая  $c = \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right]$

- - молярная

$$\mu c = \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} \right]$$

- - объемная

$$c' = \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}} \right]$$

- Наибольший интерес представляет теплоемкость в изобарном и изохорном процессах:

- -изобарная теплоемкость

$$c_p = \frac{dq_p}{dT}$$

- - изохорная теплоемкость

$$c_v = \frac{dq_v}{dT}$$

- Истинная теплоемкость  $c = \frac{\delta q}{dT}$
- - отношение элементарного количества теплоты к **бесконечно малой разности температур**
- Средняя теплоемкость  $c \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{q_{1-2}}{t_2 - t_1}$
- - отношение количества теплоты к **конечной разности температур**

- В диапазоне от 0 до 500°С (если в породе не происходят фазовые переходы) теплоемкость горных пород изменяется практически по линейному закону по эмпирической зависимости

$$C = C_{20} + n \cdot 10^{-1} (T^{\circ}C - 20)$$

- $C_{20}$  - теплоемкость пород при  $t=20^{\circ}C$

$n$  – постоянная, зависит от типа пород

При температурах  $T \gg \Theta_D$  не изменяется в зависимости от температуры  $c=3R$

$R$ - газовая постоянная,  $\Theta_D$  - температура Дебая

# Уравнение Майера

- Энтальпия  $i = u + pv$
- Продифференцируем  $di = du + d(pv)$
- Разделим на  $T$

$$\frac{di}{dT} = \frac{du}{dT} + \frac{d(pv)}{dT} = \frac{du}{dT} + \frac{RdT}{dT}$$

$$R = \frac{di}{dT} - \frac{du}{dT} \quad R = c_p - c_v; \quad \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

- Для 1 кмоля

$$\mu c_p - \mu c_v = \mu R = 8,314; \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$$

- Энтропия – функция состояния термодинамической системы, определяемая тем, что ее дифференциал  $dS$  при элементарном равновесном (обратимом) процессе, происходящем в этой системе, равен отношению бесконечно малого количества теплоты  $\delta Q$ , сообщенного системе, к термодинамической температуре системы

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad \text{Дж/К}$$



## II закон термодинамики

- I закон утверждает, что может

$$Q \rightarrow L \quad \text{и} \quad L \rightarrow Q$$

не устанавливая условий, при которых  
возможны эти превращения

- I закон не рассматривает вопрос о направлении теплового процесса, а не зная направления нельзя предсказать характер и результат

- Закон, позволяющий указать направление теплового потока и устанавливающий максимально возможный предел превращения  $Q \rightarrow L$  в тепловых машинах, представляет собой **II закон термодинамики**

**Постулат Клаузиуса:** Теплота не может переходить от холодного тела к более нагретому сама собой даровым процессом (без компенсации)

- **Томсон:** Не вся теплота, полученная от теплоотдатчика, может перейти в работу, а только некоторая ее часть, а другая часть теплоты должна перейти в теплоприемник

II закон термодинамики показывает, что

- ✓ для передачи теплоты тела должны быть разнагретыми (иметь различную температуру)
- ✓ теплота передается от более нагретого тела
- ✓ для обратного перехода теплоты (от более холодного к более нагретому) необходимо затратить дополнительную энергию
- ✓ для превращения теплоты в работу необходимо иметь два источника теплоты (горячий и холодный) и рабочее тело, совершающее работу (способное расширяться)
- ✓ вся теплота, полученная от горячего источника ни при каких условиях не может быть превращена в работу

# Математическое выражение II закона термодинамики

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

- Оценка степени необратимости (несовершенства)
- Анализ процессов

# Энтропия

- Теплота не является функцией состояния (зависит от пути процесса)
- Умножаем теплоту на интегрирующий множитель

$$\frac{1}{T}$$

- И назовем  $\frac{\delta q}{T}$  ее приведенной теплотой

$$ds = \frac{\delta q}{T} = \frac{du}{T} + \frac{pdv}{T} = \frac{c_v dT}{T} + \frac{Rdv}{v}$$

$$\frac{p}{T} = \frac{R}{v}$$

- Энтропия – функция состояния термодинамической системы, определяемая тем, что ее дифференциал  $dS$  при элементарном равновесном (обратимом) процессе, происходящем в этой системе, равен отношению бесконечно малого количества теплоты  $\delta Q$ , сообщенного системе, к термодинамической температуре системы

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad \text{Дж/К}$$

# Изменение энтропии для любого термодинамического процесса

$$ds = \frac{\delta q}{T} = \frac{du}{T} + \frac{pdv}{T} = \frac{c_v dT}{T} + \frac{Rdv}{v}$$

$$\Delta s = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$ds = \frac{\delta q}{T} = \frac{di}{T} - \frac{vdp}{T} = \frac{c_p dT}{T} - \frac{Rdp}{p}$$

$$\Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

# Термодинамические процессы идеальных газов

- К основным процессам, имеющим большое значение как для теоретических исследований, так и для практических работ, относят
  - - изохорный ( $v\text{-const}$ ),
  - - изобарный ( $p\text{-const}$ ),
  - - изотермический ( $T\text{-const}$ ),
  - - адиабатный ( $q=0$ ).



# Основные законы идеальных газов

Идеальный газ - газ, в котором отсутствуют силы взаимного притяжения и отталкивания между молекулами, а объем самих молекул пренебрежимо мал по сравнению с объемом газа

$$pV = \text{const}$$

- Бойль-Мариотт
- (англ. физ. 1664; фр. хим. 1676)

$$\frac{V}{T} = \text{const}$$

- Гей-Люссак
- (фр. физ. 1802)

$$\frac{p}{T} = \text{const}$$

- Шарль
- (фр. учен. 1787)

## Уравнение состояния идеального газа

$$p = \frac{2}{3} \frac{n}{v} \frac{m \bar{\omega}^2}{2} \qquad \frac{m \bar{\omega}^2}{2} = \beta T$$

$$pv = \frac{2n\beta T}{3}$$

$$p_1 v_1 = \frac{2n\beta T_1}{3}$$

$$p_2 v_2 = \frac{2n\beta T_2}{3}$$

$$\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2}$$

$$\frac{pv}{T} = \text{const} = R$$

$$pv = RT$$

термическое уравнение состояния  
идеального газа – Клапейрон 1834

$$[\text{Па}] \cdot \left[ \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right] = \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right] \cdot [\text{К}]$$

$$\left[ \frac{\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2}{\text{м}^2} \right] \cdot \left[ \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right] = \left[ \frac{\text{кг} \cdot (\text{м}/\text{с})^2}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right] \cdot [\text{К}]$$

- Удельная газовая постоянная – индивидуальна для каждого газа

$$pV = mRT$$

$$p \cdot 22,4 = 8314T$$

$$p\mu v = \mu RT$$

# Смесь идеальных газов

- В технике очень часто приходится иметь дело с газообразными веществами, близкими по свойствам к идеальным газам и представляющими механическую смесь отдельных газов
- Для решения практических задач необходимо уметь определять основные параметры газовой смеси
- **Газовая смесь** – смесь отдельных газов, не вступающих между собой ни в какие химические реакции
- Каждый газ в смеси независимо от других газов полностью сохраняет все свои свойства и ведет себя так, как если бы он один занимал весь объем смеси

- Молекулы газа создают давление на стенки сосуда, которое называется парциальным (частичным)
- Газовая смесь подчиняется закону Дальтона:
- **Общее давление смеси газов равно сумме парциальных давлений отдельных газов, составляющих смесь**

$$P = p_1 + p_2 + p_3 + \dots = \sum_{i=1}^n p_i$$

- **ПАРЦИАЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ** – это давление, которое имел бы каждый газ, входящий в состав смеси, если бы он один находился в том же количестве, в том же объеме и при той же температуре, что и в смеси

$$p_i V_i = m_i R_i T_i \quad p_{см} V_{см} = m_{см} R_{см} T_{см}$$

$$p_i V_i = m_i R_i T_{cm}$$

$$p_{cm} V_{cm} = m_{cm} R_{cm} T_{cm}$$

$$R_{i_{cm}} = \frac{8314}{\mu_{i_{cm}}}; R_{cm} = \frac{8314}{\mu}$$

$$\nu_{i_{cm}} = \frac{22,4}{\mu_{i_{cm}}}; \nu_{cm} = \frac{22,4}{\mu}$$

$$\nu_{i_{cm}} m_i = V_i; \nu_{cm} m_{cm} = V_{cm}$$

$$\begin{aligned} \frac{p_i}{p_{cm}} &= \frac{m_i R_i}{m_{cm} R_{cm}} = \frac{m_i 8314 \mu}{m_{cm} 8314 \mu_i} = \\ &= \frac{m_i 22,4 \nu_i}{m_{cm} 22,4 \nu_{cm}} = \frac{V_i}{V_{cm}} = r_i = \frac{p_i}{p_{cm}} \end{aligned}$$

- Способы задания смеси газов:

- Массовая концентрация

$$g_1 = \frac{m_1}{m_{см}}$$

- Объемная концентрация

$$r_1 = \frac{V_1}{V_{см}} = \frac{p_1}{P_{см}} = \frac{22,4N_1}{22,4N_{см}} = \frac{N_1}{N_{см}}$$

- Мольная концентрация

$$r_1 = \frac{N_1}{N_{см}}$$

- Молярная масса смеси газов

$$\mu_{см} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i}} \quad \mu_{см} = \sum_{i=1}^n r_i \mu_i$$

- Газовая постоянная смеси газов

$$R_{см} = \sum_{i=1}^n g_i R_i = \frac{8314}{\mu_{см}} = \frac{8314}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i}} = \frac{8314}{\sum_{i=1}^n r_i \mu_i}$$



- Соотношения между массовыми и объемными концентрациями

$$g_i = \frac{\mu_i r_i}{\mu_{cm}} = \frac{\mu_i r_i}{\sum_{i=1}^n r_i \mu_i}$$

$$r_i = \frac{\frac{g_i}{\mu_i}}{\frac{1}{\mu_{cm}}} = \frac{\frac{g_i}{\mu_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i}}$$