

План лекции:

1. Основные положения и определения термодинамики (термодинамическая система, термодинамический процесс, параметры состояния)
2. Внутренние параметры состояния (давление, температура, плотность)
3. Уравнение состояния идеального газа
4. Газовые смеси
5. Вопросы для дистанционного освоения лекции

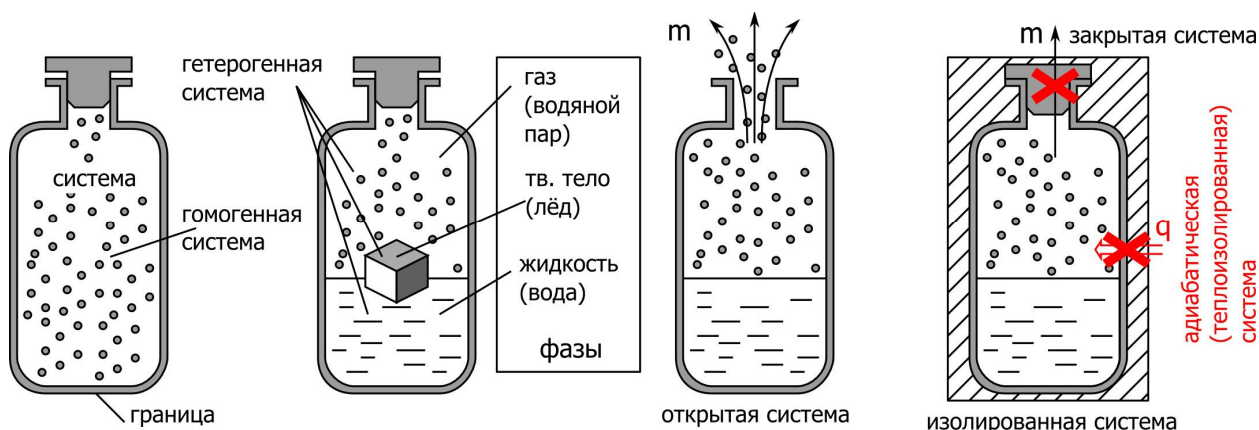
1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИКИ (ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА, ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС, ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ)

Основа, на которой развивалась термодинамика – это **закон сохранения энергии и закон сохранения массы**.

Предметом исследования термодинамики являются законы взаимных превращений различных видов энергии, связанных с переходами энергии между телами, чаще всего в форме теплоты и работы.

Классическая термодинамика не рассматривает структуру вещества и процессы, происходящие на микроуровне, а рассматривает поведение большого числа материальных частиц вещества, как целого. Вместе с тем многие из величин, рассматриваемые в термодинамике, получают своё теоретическое обоснование только на основе молекулярно-кинетической теории, статистической физики и др. наук занимающихся анализом поведения отдельных частиц вещества.

Под **термодинамической системой** понимают совокупность тел, выделенных из материального мира и являющихся объектами исследования. Как следствие система имеет определенные границы, отделяющие её от окружающей среды.



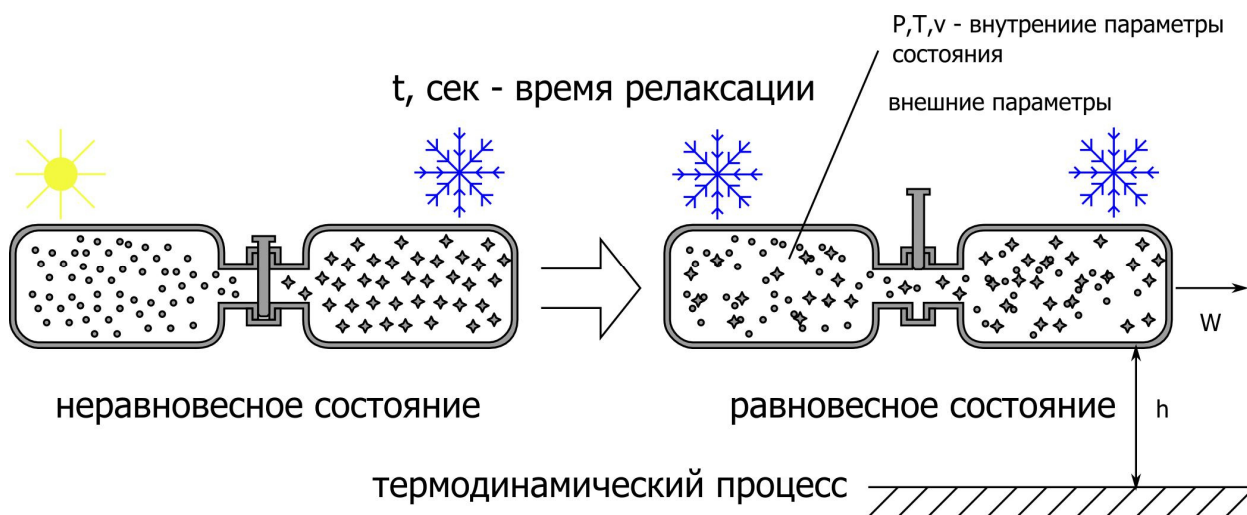
Система может быть либо **гомогенной** (однородной), обладающей одними и теми же свойствами, либо **гетерогенной**, состоящей из нескольких разнородных частей (веществ) или веществ в различных агрегатных состояниях. Гомогенные части гетерогенной системы, отделенные от остальной её части видимыми границами (поверхностями раздела), называются **фазами**.

Система, которая не взаимодействует с окружающей средой (не обменивается с окружающей средой веществом и энергией), называется **изолированной**.

Система, которая не обменивается с окружающей средой тепловой энергией, называется **теплоизолированной** или **адиабатической**.

Система, которая не обменивается с окружающей средой веществом, называется **закрытой**; обменивающаяся веществом – **открытой**.

Основной постулат термодинамики – термодинамическая система с течением времени всегда переходит в состояние **термодинамического равновесия** и самопроизвольно из этого состояния выйти не может. Термодинамическое равновесие характеризуется неизменными во времени параметрами системы, такими как давление, плотность, температура и т.д. во всех частях системы. Равновесие устанавливается в системе самопроизвольно.



В классической термодинамике под **термодинамическим процессом** понимается переход из одного равновесного состояния в другое под влиянием внешних воздействий. Такие процессы называются **равновесными**.

Напротив **неравновесными** называют такие процессы, при протекании которых разные части системы имеют разные параметры – давление, температуру, концентрацию и т.д. Процесс перехода системы из неравновесного состояния в равновесное называется **релаксацией**, а время, за которое происходит этот переход, называется **временем релаксации**.

Стационарными называют процессы, при протекании которых параметры системы не изменяются во времени, но для поддержания такого процесса необходимо постоянно воздействовать на систему. Если воздействие на систему исчезает, система переходит в равновесное состояние.

Каждое равновесное состояние характеризуется набором физических величин – равновесных **параметров состояния**. Эти параметры могут быть разделены на **внешние** – положение системы относительно силовых полей, скорость системы и **внутренние** – давление, температура, плотность и т.д.

2. ВНУТРЕННИЕ ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ (ДАВЛЕНИЕ, ТЕМПЕРАТУРА, ПЛОТНОСТЬ)

2.1. Давление

Абсолютным давлением называется сила, действующая по нормали к поверхности тела и отнесенная к единице площади этой поверхности. Согласно молекулярно-кинетической теории материи, абсолютное давление газа, пара или жидкости является результатом ударов хаотически и непрерывно движущихся молекул и определяется как:

$$p = n \frac{m_0 \overline{w^2}}{3} = \frac{2}{3} \frac{N_A}{\mu \nu} \frac{m_0 \overline{w^2}}{2}, \quad [\text{Па}], \quad (1)$$

где: $n = \frac{N_A}{\mu \nu}$, $[1/\text{м}^3]$ – число молекул вещества в 1 м^3 , $N_A = 6,02214179 \cdot 10^{23}$, $[1/\text{моль}]$ – число Авогадро, m_0 , $[\text{кг}]$ – масса молекулы, μ , $[\text{кг}/\text{моль}]$ – молекулярная масса вещества (например для гелия $\mu = 0,004 \text{ кг}/\text{моль}$), ν , $[\text{м}^3/\text{кг}]$ – удельный объём газа, $\overline{w^2}$, $[\text{м}^2/\text{с}^2]$ – среднеквадратичная скорость молекулы. Уравнение (1) называется **основным уравнением кинетической теории газов**.

Уравнение справедливо для **идеального газа**. **Идеальным газом** называют газ, движение молекул которого подчиняется классическим законам механики Ньютона. Молекулы в таком газе рассматриваются как абсолютно упругие материальные точки, силы притяжения отсутствуют, силы отталкивания проявляются только при столкновении молекул.

В системе СИ давление измеряется в Паскалях $= \text{Н}/\text{м}^2$. Используются также внесистемные единицы измерения:

$$1 \text{ бар} = 100000 \text{ Па},$$

$$1 \text{ атм} = 101325 \text{ Па},$$

$$1 \text{ ат} = 98100 \text{ Па},$$

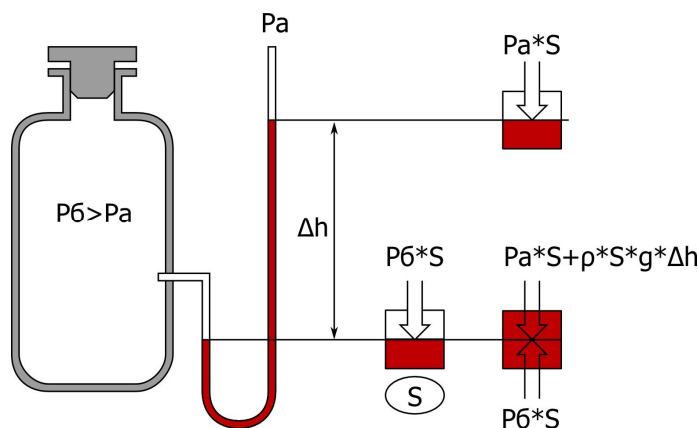
$$1 \text{ мм.рт.ст.} = 133,322 \text{ Па},$$

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

$$1 \text{ кг}/\text{кв.м.} = 9,81 \text{ Па}.$$

Для измерения давления в технике используются приборы, определяющие перепад давлений между атмосферным давлением и измеряемым. Избыточное давление измеряют с помощью **манометров**, пониженное давление измеряют с помощью **вакуумметров**.

Измерение давления с помощью жидкостного прибора.



$$P_a s + \rho s g \Delta h = P_6 s$$

$$P_6 - P_a = \rho g \Delta h \text{ избыток давления}$$

$$P_a - P_6 = \rho g \Delta h \text{ недостача давления}$$

2.2. Температура

Температура отражает состояние внутреннего термического равновесия термодинамической системы. Согласно молекулярно-кинетической теории абсолютная температура, измеряемая в Кельвинах, равна:

$$T = \frac{2}{3k} \frac{m_0 \overline{w^2}}{2}, \quad [\text{K}], \quad (2)$$

где: $k = 1,3806504 \cdot 10^{-23}$, [Дж/град] – постоянная Больцмана. Уравнение (2) называется уравнением Больцмана и показывает, что температура термодинамической системы пропорциональна средней кинетической энергии поступательного движения молекул и не зависит от массы молекул. Получено на основе модели идеального газа.

Согласно уравнению (2), при абсолютном нуле температур поступательное движение молекул в газе прекращается. Температура, отсчитываемая от 0 К, называется **абсолютной температурой**, а шкала температур называется Шкалой Кельвина. Величина 1 Кельвина принята равной 1 градусу Цельсия.

В международной практической шкале температур Цельсия за 0 температур выбрана температура таяния льда при нормальном атмосферном давлении. За 100 градусов Цельсия принята температура кипения воды при том же давлении.

$$T, [K] = t, [^{\circ}C] + 273,15. \quad (3)$$

В некоторых странах принята шкала температур Фаренгейта. За 0 температур принимается температура таяния смеси льда с поваренной солью, а температура кипения воды равна 212 градусов Фаренгейта.

$$t, [^{\circ}C] = (t, [^{\circ}F] - 32) \cdot 5/9. \quad (4)$$

Существует шкала Рэнкина. В этой шкале за 0 температур принимается абсолютный ноль Кельвина, а один градус равен градусу Фаренгейта.

$$T, [K] = 9/5 \cdot t, [^{\circ}R]. \quad (5)$$

2.3. Плотность, удельный объём

Плотностью называют массу вещества заключённую в единице объёма.

$$\rho = m_0/n = \frac{m}{V}, \left[\frac{кг}{м^3} \right], \quad (6)$$

где: m , [кг] – масса газа, находящаяся в объёме V , [м³].

Удельный объём – это величина обратная плотности газа:

$$v = \frac{1}{\rho}, \left[\frac{м^3}{кг} \right]. \quad (7)$$

3. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Для химически однородной термодинамической системы (газ, жидкость, изотропное твердое тело) при отсутствии внешних полей (гравитационного, электрического, магнитного) число независимых параметров, однозначно определяющих равновесное состояние системы, будет равно двум из трех (p, v, T), так как любой из этих трех параметров является однозначной функцией двух заданных: $p = f(v, T)$, $v = f(p, T)$, $T = f(p, v)$.

Уравнение, устанавливающее связь между давлением, температурой и удельным объёмом среды постоянного состава, называется **термическим уравнением состояния**:

$$f(p, v, T) = 0. \quad (8)$$

Уравнение (8) в пространстве с координатами p, v, T образует поверхность, которая называется **поверхностью состояния** или **термодинамической поверхностью**. Эта поверхность описывает все равновесные состояния термодинамической системы.

Плоскости, пересекающие поверхность состояния при постоянном значении одного из параметров, образуют зависимости, называемые **диаграммами состояния**.

Для идеального газа из основного уравнения кинетической теории и уравнения Больцмана можно записать:

$$pv = \frac{kN_A}{\mu} T \quad \text{или} \quad pv = RT. \quad (9)$$

Это уравнение носит название уравнения Клапейрона, а величина $R = kN_A/\mu$, [Дж/(кг·град)] – носит название **газовой постоянной**.

Всякий **реальный газ** при малой плотности и при не слишком низких температурах ведет себя как идеальный, и его свойства с высокой точностью описываются уравнением Клапейрона. Поведение многих технически важных газов и их смесей в условиях работы тепловых машин (двигателей внутреннего сгорания, газотурбинных установок, жидкостных ракетных двигателей) не дает значительных отклонений в свойствах, описываемых уравнением Клапейрона.

Уравнение (9) в виде:

$$pv = \frac{\mathcal{R}}{\mu} T \quad (10)$$

носит название Клапейрона - Менделеева, а величина $\mathcal{R} = N_A k = 8,31441$, [Дж/(моль·град)] – **универсальной газовой постоянной**.

Для практических расчётов часто нужно знать массовый расход газа, который в свою очередь зависит от плотности. В этом случае более удобной является следующая форма записи уравнения состояния:

$$p = \rho RT, \quad [\text{Па}]. \quad (11)$$

4. ГАЗОВЫЕ СМЕСИ

На практике чаще приходится встречаться не с чистыми газами, а с их механическими смесями; одной из самых важных смесей является воздух, представляющий собой смесь азота и кислорода (с небольшой примесью аргона, углекислоты и водяного пара). Большое значение имеют такие газовые смеси, как природный газ (метан и другие углеводороды, углекислота, окись углерода и др.), продукты сгорания топлив (углекислота, азот, водяной пар и т.п.).

По **закону Дальтона** давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений её частей. **Парциальное давление** – это давление, которое оказывала бы однородная часть газовой смеси на стенки сосуда в отсутствие других частей (компонентов) смеси.

$$p = \sum_{i=1}^n p_i. \quad (12)$$

Закон сохранения массы для смеси газов:

$$m = \sum_{i=1}^n m_i. \quad (13)$$

Состав смеси задаётся в виде **массовых** K_i или **мольных** X_i концентраций (долей) компонент смеси. Численно мольная концентрация компонента газовой смеси равна его **объёмной концентрации**:

$$\begin{aligned}
K_i &= \frac{m_i}{m}, \left[\frac{\text{кг}}{\text{кг}} \right], \sum_{i=1}^n K_i = 1, \\
M_i &= \frac{m_i}{\mu_i}, \quad M = \sum_{i=1}^n M_i, \\
X_i &= \frac{M_i}{M}, \left[\frac{\text{моль}}{\text{моль}} \right], \sum_{i=1}^n X_i = 1.
\end{aligned}
\tag{14}$$

Молекулярную массу смеси можно определить следующим образом:

$$\mu = \frac{m}{M} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{\sum_{i=1}^n M_i} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{K_i}{\mu_i}} = \sum_{i=1}^n X_i \mu_i.
\tag{15}$$

5. ВОПРОСЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ОСВОЕНИЯ ЛЕКЦИИ

| |
|--|
| 1. Основа термодинамики? |
| Ответ: |
| 2. Дайте определение фазы. |
| Ответ: |
| 3. Дайте определение термодинамического процесса |
| Ответ: |
| 4. Запишите уравнение Больцмана. |
| Ответ: |
| 5. Запишите уравнение состояния идеального газа в форме уравнения Клапейрона-Менделеева. |
| Ответ: |
| Фамилия Имя Отчество: |
| Группа: |
| Подпись: |
| Дата: |