

***Газовые законы. Идеальный газ и
уравнение его состояния.
Модель идеального газа.***

Филимонова Л.В.
16.02.2006 г.



Задание к этой лекции

Подготовить ответы на вопросы:

- Опытные законы идеального газа (Бойля-Мариотта, Гей-Люссака). Изопроцессы и их диаграммы.
- Давление с кинетической точки зрения. Основное уравнение МКТ (1-я форма).
- Тепловое движение. Температура. Измерение температур.
- Идеальный газ. Уравнение состояния идеального газа. Уравнение Клайперона-Менделеева.
- Следствия основного уравнения МКТ и уравнения состояния идеального газа.

Опытные законы, описывающие переходы газа из одних состояний в другие:

- Закон **Бойля-Мариотта** (1662 и 1676): произведение давления газа на занимаемый им объем при постоянной температуре есть величина постоянная: $PV = \text{const}$ при $m = \text{const}$ и $T = \text{const}$.
- Закон **Гей-Люссака** (1802): объем газа V при постоянном давлении линейно растет с температурой: $V_t = V_0(1 + \alpha t)$ при $m = \text{const}$ и $p = \text{const}$.
- Закон **Гей-Люссака (Шарля)**: Давление газа при постоянном объеме растет с температурой по тому же закону: $p_t = p_0(1 + \alpha t)$ при $m = \text{const}$ и $V = \text{const}$.

Здесь α - коэффициент объемного расширения или термический коэффициент давления, одинаковый для всех газов и равный

$$\alpha = \frac{1}{273,15} \text{град}^{-1}$$

Шкала Кельвина

- Изменив начало отсчета температуры

$$T = t + \frac{1}{\alpha} = t + 273,15^{\circ}$$

переходим к абсолютной температуре.

- Нуль этой шкалы соответствует

$$T_0 = \frac{1}{\alpha} = 273,15^{\circ} K$$

называется абсолютным нулем.

Получаем:

- $V = V_0 \alpha T$ при $m = \text{const}$ и $p = \text{const} \Rightarrow \frac{V}{T} = \text{const}$ (2)

- $p = p_0 \alpha T$ при $m = \text{const}$ и $V = \text{const} \Rightarrow \frac{p}{T} = \text{const}$ (3)

Т.е. согласно закону Гей-Люссака объем (давление) газа **пропорционален** его абсолютной температуре.

Границы применимости

- Эти законы справедливы для газов, в которых средние расстояния между молекулами значительно превышают диаметры молекул.
- Это имеет место лишь при достаточно высоких температурах (больших значениях T). Т.е. формулы (1)-(3) не верны вблизи $T=0$, т.е. когда **кинетическая энергия** молекул газа уменьшается и начинает сказываться **потенциальная энергия** взаимодействия между молекулами.

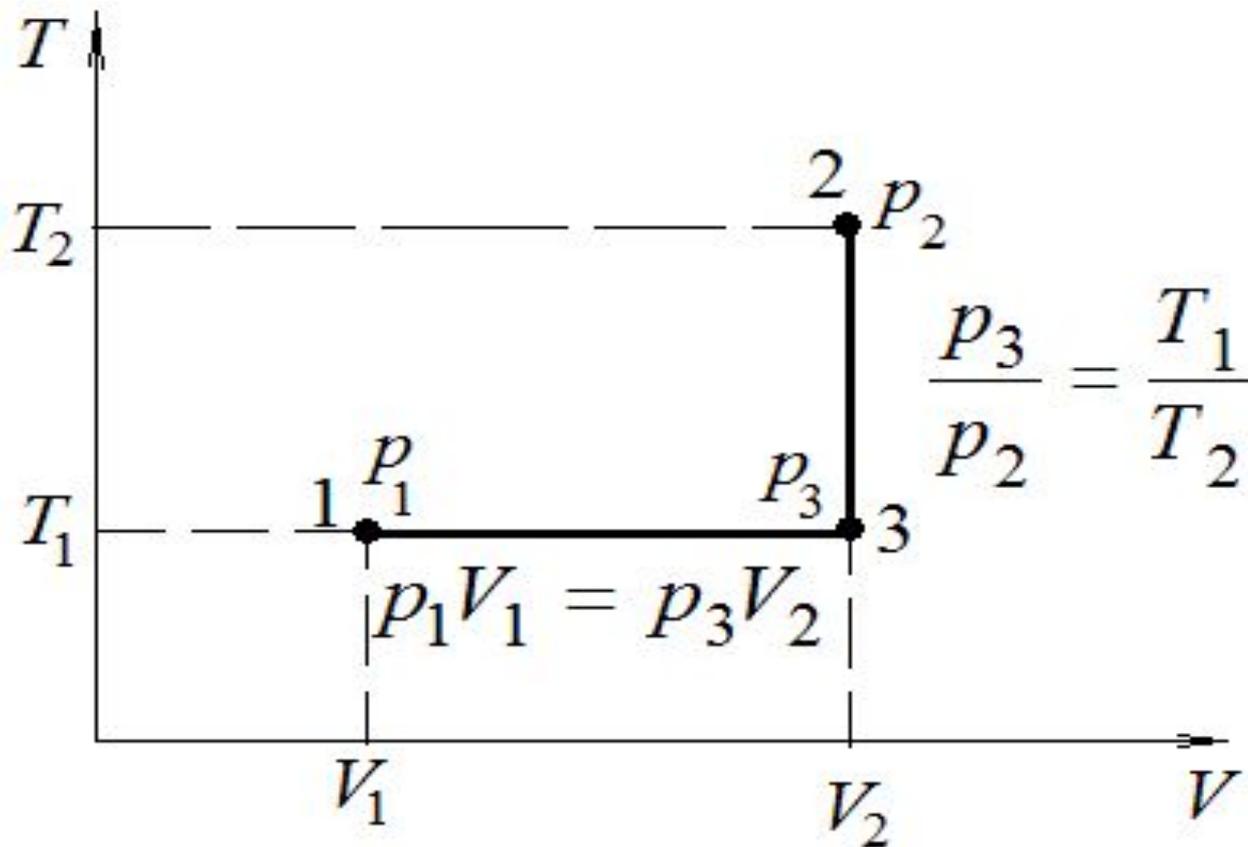
- **Закон А. Авогадро:** моли любых газов при одинаковых температуре и давлении занимают одинаковые объемы (при н.у. этот объем равен $22,41 \cdot 10^{-3}$ м³/моль).
- *Опр.* Парциальное давление – давление, которое оказывал бы газ, если бы он один занимал объем, равный объему смеси при той же температуре.
- **Закон Дж. Дальтона:** давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений входящих в нее газов.

Идеальный газ

- Опр.1. *Идеальным газом* наз. газ, подчиняющийся законам Гей-Люссака и Бойля Мариотта.
- Опр.2. Уравнение, связывающее основные параметры состояния газа, наз. *уравнением состояния* газа.
- Газ как макроскопический объект (в отличие от жидкого и твердого тела) не имеет собственного объема. Если некоторая масса газа занимает объем V , то при заданной температуре T в этом объеме установится определенное давление P .
- Величины m , P , V , T и являются макроскопическими параметрами газа. Эти параметры связаны уравнением состояния газа. Уравнение состояния газа было получено на основе анализа частных эмпирических газовых законов (1)-(3).

- Французский физик и инженер Б. Клапейрон вывел уравнение состояния идеального газа, объединив законы Бойля-Мариотта и Гей-Люссака.
- Пусть некоторая масса газа занимает объем V_1 , имеет давление p_1 и находится при температуре T_1 . Эта же масса газа в другом произвольном состоянии характеризуется параметрами P_2 , V_2 и T_2 . (рис.)
- Переход из состояния 1 в состояние 2 осуществляется в виде двух процессов:
 - 1) изотермического и 2) изохорного.

Уравнение Клапейрона



$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \longrightarrow \frac{pV}{T} = B = \text{const}$$

Уравнение Менделеева

- Менделеев объединил уравнение Клапейрона с законом Авогадро, отнеся его к 1 молю и взяв молярный объем V_m ($V_m = 22,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$).
- Согласно закону Авогадро при одинаковых P и T моли всех газов занимают одинаковый объем V_m , поэтому постоянная V будет *одинаковой для всех газов*. Эта общая постоянная обозначается R и наз. *молярной газовой постоянной*.

$$pV_m = RT$$

Уравнение Клапейрона-Менделеева

- Для произвольной массы газа:

$$pV = \frac{m}{\mu} RT$$

- Опр.2'. Газ, свойства которого описываются этим уравнением состояния, называется *идеальным*.
- Идеальным газом можно считать любой газ при достаточно низких давлениях.

Границы применимости

- При нормальной температуре уравнение М-К запишется так:

$$\frac{pV}{RT_0} = 1$$

- Это отражает **суть** закона Бойля-Мариотта: произведение pV одинаково **для всех газов** и должно иметь одно и то же значение при различных давлениях.

Границы применимости

- На рис. 5.1 видно, что приведенное утверждение расходится с экспериментом, так как для различных газов отношения PV/RT_0 различны и зависят от давления (сплошные кривые).
- Однако это расхождение уменьшается с уменьшением давления. Уже при давлении в 1 атм оно для простых газов (H_2 , O_2) значительно меньше одного процента и становится пренебрежимо малым, если $p < 0,1$ атм.
- Таким образом, при достаточно малых давлениях свойства всех газов практически одинаковы и подчиняются уравнению Менделеева-Клапейрона

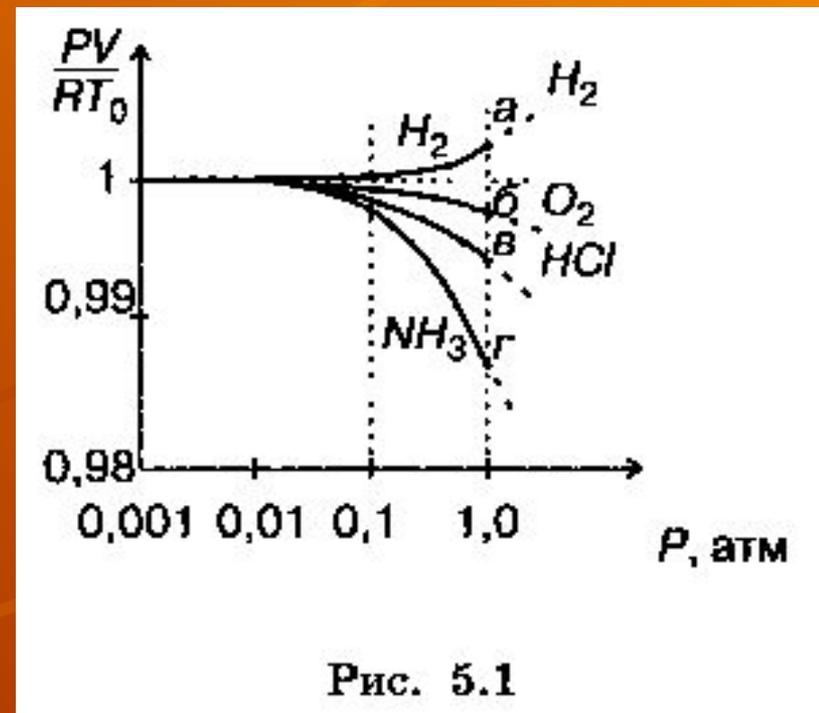


Рис. 5.1

Модель

- МКТ использует атомно-молекулярную **модель идеального газа**.
- В этой модели идеальный газ представляется совокупностью хаотически движущихся **исчезающе** малых по размерам абсолютно упругих шариков конечной массы, взаимодействие между которыми происходит лишь в момент соударений. Характерным движением частиц газа является свободное поступательное движение с постоянной скоростью.

Согласно идеализированной модели:

1. собственный объем молекул газа пренебрежимо мал по сравнению с объемом сосуда (атомы и молекулы которого могут считаться материальными точками);
2. между молекулами газа **отсутствуют** силы взаимодействия;
3. столкновения газа между собой и со стенками сосуда **абсолютно** упругие.

Вопрос на засыпку

Что называется
идеальным газом?

Ответ:

- Смотря с какой точки зрения:
 1. Феноменологический подход
 2. Теоретический (модельный) подход
 3. Иной взгляд (ваш!)

Две точки зрения

- Между точкой зрения феноменологической и точкой зрения МКТ есть соответствие: состояние газа характеризуется определенными параметрами (температура, давление, масса, объем, молярная масса).
- Рассмотрим эти параметры с кинетической точки зрения.

Давление идеального газа. Основное уравнение МКТ.

- Давление. Поместим некоторую массу газа в сосуд под поршень площадью S . Чтобы удержать газ в определенном объеме, надо приложить силу F . Значит, газ действует на поршень с такой же по величине силой.
- Если увеличить площадь поперечного сечения поршня вдвое, то и сила действия на поршень со стороны газа тоже увеличится вдвое. Следовательно, постоянной остается сила действия со стороны газа на единицу площади поршня, называемая давлением газа: $P=F/S$.
- ФВ – давление газа P – макроскопическая характеристика состояния газа наряду с температурой и объемом.

2 формы основного ур-я МКТ

$$p = \frac{1}{3} m n \overline{V^2} = \frac{1}{3} m n \langle v_{кв} \rangle^2$$

$$p = \frac{2}{3} n \langle \varepsilon_0 \rangle$$

Температура с молекулярно-кинетической точки зрения

- Температура. Понятие «температура» занимает центральное место в учении о тепловых процессах. Это понятие является довольно сложным и длительно уточнялось по мере развития термодинамики и статистической физики.
- Понятие температуры имеет:
 1. ярко выраженный субъективный аспект,
 2. фундаментальную термодинамическую основу,
 3. непосредственную связь с молекулярно-кинетическими процессами и
 4. экспериментально-методическую обеспеченность для эмпирического определения и измерений.

- Опр. Соприкосновение тел, при котором возможна лишь передача тепла от одного тела к другому, будем наз. *тепловым контактом* этих тел. Мы говорим, две системы имеют *равные* температуры, если при тепловом контакте их состояния **не меняются**.
- Впервые понятие температуры возникло из субъективных ощущений в области восприятия «степени нагретости» тела.
- Объективная возможность введения понятия температуры связана с важным постулатом термодинамики: **«Если две термодинамические системы находятся в тепловом равновесии с третьей, то они должны быть в равновесии и между собой»**.
- Указанное равновесие не зависит от объема, давления, плотности и других (помимо температуры) величин, определяющих состояние систем.

- В замкнутой системе всегда устанавливается состояние теплового равновесия.
- Равновесие сопровождается **одинаковой температурой** любой части системы и достигается за счет обмена энергиями атомов и молекул в результате столкновения.
- Для характеристики теплового равновесия тел и потребовалось ввести специальную величину, названную температурой. Т.е. t – параметр, характеризующий тепловое равновесие системы.
- Температура — единственная величина, которая обязательно одинакова во всех частях системы, находящейся в термодинамическом равновесии. Так, в системе надутых воздушных шариков в условиях равновесия могут различаться объемы шариков, давления в них, плотность газа и т. д.; только температура обязательно должна быть одинакова во всех точках системы.

Верно ли утверждение???

- Если температура частей системы не одинакова, то система не находится в термодинамическом равновесии.
- Чем больше разнятся температуры частей, тем значительнее отступление от равновесия, тем интенсивнее процесс теплообмена между ними.
- При этом энергия всегда переходит от более нагретых частей к более холодным.

Вывод:

- Существует пропорциональность между средней кинетической энергией теплового движения молекул и температурой t .

- Основное уравнение МКТ

$$p = \frac{2}{3} n \langle \varepsilon_0 \rangle$$

- Опираясь на опыт, можно записать Θ - некая температура

$$\Theta = \frac{2}{3} \langle \varepsilon_0 \rangle$$

- Например, нормальная температура человеческого тела в единицах энергии равна $4 \cdot 10^{-21}$ Дж, вместо 36,6 градусов Цельсия. Поэтому сохранена привычная хорошо отработанная система измерения температуры в градусах.
- Переход к абсолютной шкале: $\Theta = kT$.

Смысл температуры

- Отсюда средняя кинетическая энергия поступательного движения одной молекулы идеального газа

$$\langle \varepsilon_0 \rangle = \frac{m_0 \langle v_{кв} \rangle^2}{2} = \frac{3}{2} kT$$

Вывод

- *термодинамическая температура является мерой средней кинетической энергии поступательного движения молекул идеального газа.*
- *молекулярно-кинетический смысл понятия температуры: температура тела – есть количественная мера энергии теплового движения молекул, из которых состоит это тело.*



- Следствие: при одинаковой температуре средние кинетические энергии молекул всех газов одинаковы, несмотря на различие масс молекул разных газов.
- Температура – не аддитивная величина, ее нельзя сравнить с эталоном.



Вопрос на засыпку:

Чему равна средняя
кинетическая энергия
молекулы газа при
абсолютном нуле?

Ответ:

При абсолютном нуле система находится в состоянии с наименьшей возможной энергией.

Термометрия

- Разработка и развитие методов измерения температуры привели к созданию специального раздела физики, который называется термометрией.
- В отличие от давления, объема и многих других физических величин, температура не может быть измерена **непосредственно**.
- Измерение температуры производится косвенными методами, основанными на использовании таких свойств тел, которые могут быть **измерены непосредственно**.
- **Тело**, выбираемое для измерения температуры, называется **термометрическим**, а величина, используемая для измерения температуры, — **термометрической величиной**.

Вопросы на раздумье■

- Что можно взять в качестве термометрического тела?
- Какая величина может быть принята за термометрическую?

Ответ:

- В простейших и наиболее распространенных термометрах в качестве термометрического тела используется газ или жидкость, а в качестве термометрической величины объем.



Термометрические шкалы

Увеличение объема термического тела при нагревании и дает косвенную информацию об изменении температуры. Если зависимость объема от температуры линейна, то достаточно выбрать **две реперные** точки, приписать этим точкам определенные значения температуры t_1 и t_2 и разделить полученный интервал на некоторое число промежутков (делений температурной шкалы).

- Наличие такой шкалы и позволяет измерять значение температуры в интервале между реперными точками.
- Очевидно, что подобные единицы измерения температур и температурные шкалы являются эмпирическими и условными.
- Наиболее известны три эмпирические шкалы температур: Цельсия, Реомюра и Фаренгейта, отличающиеся значениями температур реперных точек.
- В качестве реперных точек Цельсий выбрал температуру таяния льда ($t_1 = 0^\circ\text{C}$) и кипения воды ($t_2 = 100^\circ\text{C}$) при нормальном давлении и разделил промежуток $t_2 - t_1$ на 100 интервалов — градусов. (Приведен современный вариант шкалы Цельсия).

-
- Эмпирическая температура известна точно лишь для реперных точек.
 - Промежуточные температуры зависят от того, **каким образом изменяется** с изменением температуры термометрическая величина (например, высота ртутного или спиртового столбика).

Вопросы на засыпку:

- Температура газа равна 20°C . Чему равна температура одного моля этого газа?
- Чему равна температура одной молекулы этого газа?
- В каких пределах может меняться температура тела?

Ответ на второй вопрос:

- Температура — макроскопическая характеристика термодинамических систем и для отдельной молекулы смысла не имеет.

3-я форма основного уравнения МКТ

$$p = nkT$$

На заметку

- ▶ Основное уравнение МКТ идеального газа **хорошо** выполняется и для реальных достаточно разреженных газов несмотря на то, что молекулы последних не являются исчезающе малыми абсолютно упругими шариками, а их отражение от стенок сосуда в общем случае не подчиняется закону зеркального отражения и существенно зависит от свойств поверхности сосуда.
- ▶ Однако в равновесных условиях тангенциальные составляющие импульсов отдельных молекул во всех случаях не дают вклада в конечный результат, а нормальные составляющие (по закону сохранения импульса замкнутой системы) определяют давление газа, в соответствии с формулой $p = nkT$.

Задание

- Выведите из основного уравнения МКТ:

1. Уравнение состояния идеального газа.
2. Формулу для средней квадратичной скорости

Задание на следующую лекцию

- Среднее число столкновений и длина свободного пробега молекул газа.
- Явления переноса: диффузия, внутреннее трение, теплопроводность.
- Элементы молекулярно-кинетической теории явлений переноса.
- Особенности диффузии и теплопроводности в конденсированных средах.

Что Ты подготовил к лекции сегодня?

- Что подготовишь нам к следующей лекции?
- Д/з: примеры решения задач по методичке из П/З №1