Физика 10 класс

Занятие 4. Конденсированнные среды.

1 Фазы и фазовые превращения

1.1 Определение

Фаза - физически однородная часть вещества, которая имеет ярковыраженную границу раздела.

Важные наблюдения:

- Если рассматривается сосуд с водой, в котором находятся водяные пары, то это **двухфазная система**.
- Если в эту систему добавить лед, то она станет трехфазной(*лед, вода, водяные пары*).

После введенного определения возникает логичный вопрос: **при каких условиях несколько фаз могут находиться в равновесии**, то есть когда выполняется **тепловое и механическое равновесие, в котором массы фаз не изменяются**?

- Данная тема достаточно подробно изложена во 2 томе Сивухина (параграф 112) и ее можно прочитать для саморазвития. В дальнейшем она не будет использоваться при решении задач.

2 *Уравнение Клапейрона-Клаузиуса*

2.1 Мотивация

В данном параграфе будет получено уравнение, которое связывает давление и температуру в фазовом превращении, сопровождающимся выделением или поглощением тепла.

- С помощью уравнения Клаузиуса-Клапейрона можно получить зависимость давления насыщенных водяных паров от температуры

2.2 Вывод уравнения

Проведем цикл Карно с системой, состоящей из жидкости и газа (рис.1).
Заметим, что **давление насыщенного пара зависит только от температуры. Поэтому в изотермическом процессе** $p = const$.
Изначально система характеризуется точкой 1. Если подвести к системе тепло, то жидкость начнет испаряться и совершать работу, в какой-то момент времени газ окажется в состоянии 2. Далее адиабатически газ переводится в состояние 3 ($T_1 \approx T_2$). После изотермического и адиабатического процессов мы приходим в состояние 1.
В результате система будет совершать **бесконечно малый цикл Карно**
Система получала теплоту только в процессе 12.

$$Q_1 = q$$

Посчитаем работу:

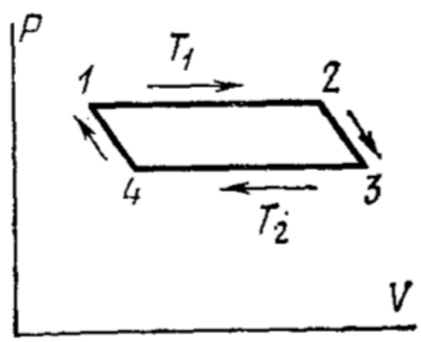

Рис. 1. Цикл Карно для двухфазной системы

- в процессе 12 система совершила положительную работу $A_1 = p(T_1)(\upsilon_1 - \upsilon_2)$, где υ- удельный объем системы.
- в процессе 34 отрицательную работу $A_2 = -p(T_2)(\upsilon_1 - \upsilon_2)$
- работой на адиабатах можно принебречь

Подставим полученные формулы в выражение

$$\frac{A}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

После преобразований получаем **уравнение Клапейрона-Клаузиуса**

$$\frac{dP}{dT} = \frac{q}{T(\upsilon_1 - \upsilon_2)} \tag{1}$$

где q- удельная теплота фазового превращения, v_1, v_2- удельные объемы.

Наблюдения:

- Удельный объем v - объем который занимает единица массы вещества: $v = \frac{1}{\rho}$
- Вывод уравнения Клапейрона -Клаузиуса был проведен для процесса испарения, но он с легкостью может быть расширен на случай других фазовых превращений.
- Важно понимать, что q - теплота, которую нужно **подвести** к системе, чтобы совершить фазовый переход из 1 во 2.
- Для случая испарения q будет теплота парообразования, v_1 - удельный объем жидкости

Упражнение (1 балл): Получить зависимость давления насыщенных паров от температуры, пользуясь формулой (1), считая, что L - удельная теплота парообразования не зависит от T.

- Важно запомнить, что **зависимость давления насыщенных паров от температуры имеет вид:**
$$p \sim \exp(-\frac{1}{T})$$
Этот факт может пригодиться во время лабораторного практикума.

3 Парообразование

Рассмотрим явление образования пара со свободной поверхности жидкости. В случае, если параообразование носит спокойный характер, то такой процесс называют **испарением**. Но при достижении определенной температуры характер парообразования резко меняется: внутри жидкости растут пузырьки пара, увлекая за собой и саму жидкость. Данное явление называется **кипением** (рис.2). Но как определить

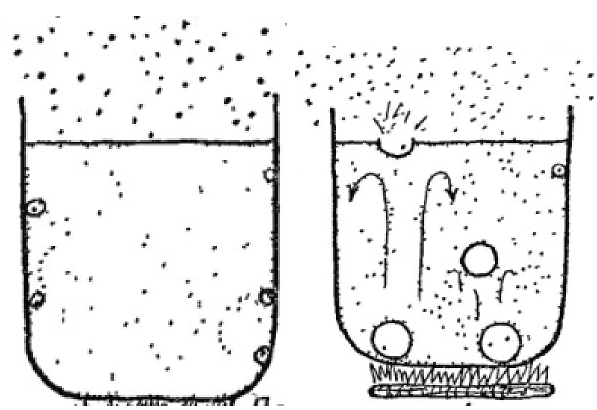

Рис. 2. Слева жидкость еще не достигла точки кипения, справа уже идет бурный процесс

точку кипения? Зависит ли она от каких-либо параметров системы или же является постоянной? Ответы не эти вопросы будут рассмотрены в следующей части.

3.1 Кипение

Рассмотрим жидкость, в которой имеются пузырьки воздуха. На поверхности каждого пузыря идет процесс парообразования до тех пор, пока не наступит состояние динамического равновесия (насыщение). Все время внешнее давление у пузырька равно давлению в нем. Первое складывается из атмосферного, гидростатического давлений и давления Лапласа (про это явление будет рассказанно позже), а второе из давлений насыщенных паров и воздуха. (рис.3)
Запишем равенство давлений:

$$p_{\text{атм}} + \underbrace{\rho g h}_{\text{гидрост. давление}} + \underbrace{\frac{2\sigma}{R}}_{\text{Лапласа}} = p_{\text{газа}} + p_{\text{нас.п}} \tag{2}$$

Замечания:

- Во всех задачах (если не сказано обратного) для упрощения выкладок пренебрегается гидростатическим, Лапласовым давлениями и давлением газа. Поэтому остается равенство:

  $$p_{\text{атм}} = p_{\text{нас.п}}$$

  Это равенство называется **условием кипения**.

- Важно обратить внимание, что давление насыщенных паров растет при увеличении температуры. То есть в процессе повышения температуры в какой-то момент начнется кипение. Температура, при которой начинается кипение, называется **температурой кипения**.
- Теператураа кипения не является постоянной величиной так как она зависит от атмосферного давления. **При уменьшении атмосферного давления уменьшается температура кипения**.

4 Поверхностное натяжение

4.1 Определение

Мотивация:
Молекулы жидкости взаимодействуют друг с другом. Для молекул, удаленных от поверхности, силы взаимодействия уравновешиваются. Если же рассмотреть частицу в поверхностном слое, то ситуация будет асимметрична (рис.4)

Для поверхностного натяжения можно ввести несколько определений. Мы не будем

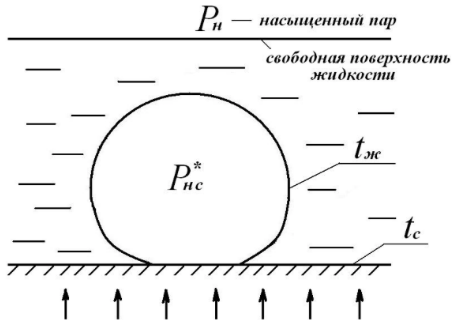

Рис. 3. Зародыш пузырька в толще воды

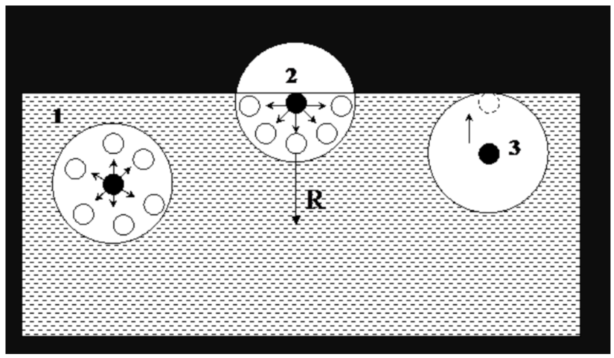

Рис. 4. Природа сил поверхностного натяжения.

доказывать их эквивалентность, но будем пользоваться этим фактом.

Поверхностное натяжение -

1. работа, которую надо затратить, чтобы **изотермически и квазистатически** увеличить поверхность жидкости на единицу при сохранении ее объема неизменным.

2. Сила на единицу длины, действующая на границе раздела нескольких сред и направленная по границе раздела двух сред.

Наблюдения:

- Силы действуют по касательной к границе раздела двух сред.
- Из второго определения следует, что на границе трех сред существует три силы поверхностного натяжения. Если мы рассмотрим капельку масла на толще воды, то возникнут три силы, которые характеризуются коэффициентами поверхностного натяжения (рис.5) масло-вода (σ_2), масло-воздух (σ_1), вода-воздух (σ).

- Иногда в задачах рассматривается система с границей раздела трех сред, но при этом в условии говорится только про один коэффициент поверхностного натяжения. Тогда возникает вопрос: для каких двух границ раздела дан этот коэффициент и почему нам не дали других коэффициентов? Почти всегда можно считать, что дан тот коэффициент, который будет фигурировать в ответе.

  Приведем пример такой задачи: *найти высоту поднятия жидкости в капиляре радиуса r, если известны угол смачивания Θ и коэффициент поверхностного натяжения σ*
  Можно самостоятельно убедиться, что в ответе этой задачи ($h = \frac{2\sigma}{\rho g a}\cos(\Theta)$) фигурирует коэффициент для раздела сред жидкость-газ.

- Важно обратить внимание, что на значение коэффициента σ **влияют обе среды**.
- Часто возникает проблема в нахождении количества сил поверхностного натяжения. Можно запомнить простой алгоритм:
  - Рассмотрим точку, для которой хотим записать второй закон Ньютона. Допустим, что эта точка является границей раздела n сред (в примере выше $n = 3$)
  - Количество сил поверхностного натяжения будет равно n (верно для любых n, кроме $n = 2$: в этом случае кол-во сил равно 1), причем каждая сила будет направлена по касательной к границе раздела двух сред.

Замечания:

- Значение коэффициента поверхностного натяжения зависит от температуры по следующему правилу:
$$q = -T\frac{d\sigma}{dT}$$
- Из формулы видно, что σ понижается с повышением температуры.
- **Во всех задачах по умолчанию не рассматривается зависимость $\sigma(T)$, то есть принято считать** $\sigma = const$. Если же составители задачи рассматривают эту зависимость, то это будет написано в условии задачи.

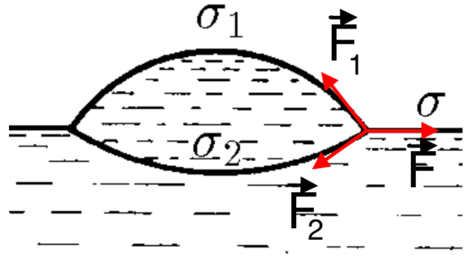

Рис. 5. Силы поверхностного натяжения.

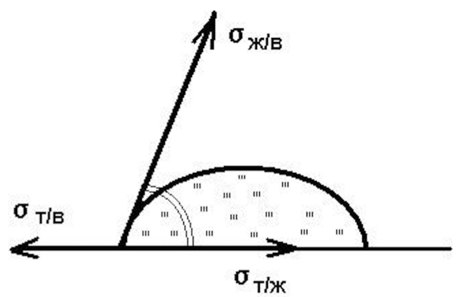

Рис. 6. Краевой угол.

4.2 Краевые углы

Рассмотрим каплю, которая граничит с **твердым телом и газом**. Тогда угол Θ (рис.6) будем называть краевым углом.
Иначе говоря, краевым углом называется угол между касательными к границам раздела сред твердое тело-жидкость и жидкость-газ (включает в себя область, занятую жидкостью).

- **Полное смачивание** $\Theta = 0$
- **Частичное смачивание** $\Theta \in [0, \frac{\pi}{2}]$
- **Частичное несмачивание** $\Theta \in [\frac{\pi}{2}, \pi]$
- **Полное несмачивание** $\Theta = \pi$

4.3 Разность давлений по разные стороны изогнутой поверхности жидкости.

Рассмотрим две среды, которые имеют касательную поверхность. Выберем произвольную точку на этой поверхности. Предположим что эта поверхность является поверхностью двойной кривизны (рис.7). Рассмотрим маленький прямоугольник ABCD, обозначим за R_1 радиус кривизны дуг AB и CD, а за R_2 радиус кривизны дуг AD и BC. Заметим, что на боковые стороны AD и BC будут действовать силы поверхностного натяжения, которые будут равны по модулю, но иметь разное направление. Модуль сил будет равен $F = \sigma l_{AD}$. Если просуммировать силы, то

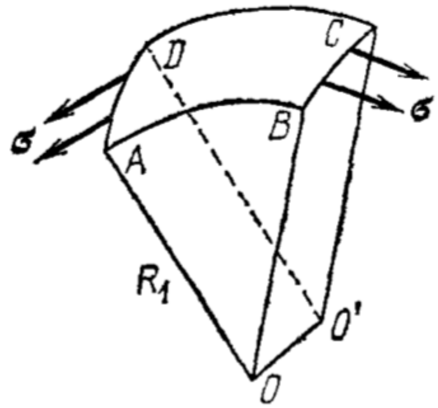

Рис. 7. Поверхность двойной кривизны.

результирующая сила будет вертикальна и равна по модулю

$$F_{\text{рез}} = \sigma l_{AD}\varphi = \sigma l_{AD}\frac{l_{AB}}{R}$$

где R - радиус кривизны.

Так как мы рассматриваем поверхность двойной кривизны, то

$$F = F_1 + F_2 = \sigma l_{AB} l_{AD}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$$

Если разделить на S, то получим **формулу Лапласа**

$$\Delta p = \sigma\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \tag{3}$$

Замечания:

- В случае **сферической поверхности**

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R}$$

- Если рассматривается мыльный пузырь, то он состоит из двух мыльных пленок, между которыми находится вода. Поэтому разность давлений внутри и снаружи пузыря **в два раза больше, чем разность давлений в случае выше**

$$\Delta p = \frac{4\sigma}{R}$$