

ЛЕКЦИЯ 11-12 (6)

ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА. РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОСТАТИКИ

Содержание лекции

ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА

Общая характеристика явлений переноса

Диффузия

Теплопроводность

Вязкость

РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ

Изотермы Ван-дер-Ваальса

ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Свойства зарядов

Закон Кулона

Напряжённость электрического поля

Принцип суперпозиции полей

Силовые линии

Теорема Остроградского-Гаусса и её применение к расчету электрических полей

ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА

Общая характеристика явлений переноса

До сих пор в предыдущих разделах мы вели речь только о равновесных состояниях термодинамических систем. Однако никакая система изначально не является равновесной. К этому состоянию она должна прийти, а для этого в процессе установления состояния равновесия в системе неизбежны пространственные переносы энергии, массы или импульса.

Такие случаи перераспределения энергии, массы и импульса получили название явлений переноса. Они представляют собой необратимые процессы в термодинамически неравновесных системах, при которых происходит:

Перенос энергии — явление теплопроводности.

Перенос массы — явление диффузии.

Перенос импульса от быстро движущихся областей к медленным областям — явление вязкости (внутреннего трения).

Диффузия

Диффузия — процесс выравнивания концентраций в смеси веществ, обусловленный тепловым движением. Поток массы j — это масса вещества, переносимая за единицу времени через единичную площадку, расположенную перпендикулярно направлению переноса вещества.

Закон Нернста-Фика: поток массы j_m пропорционален градиенту плотности.

$$j_m = -D \frac{d\rho}{dx}, \quad (6.1)$$

где D – коэффициент диффузии

$\frac{d\rho}{dx}$ – градиент плотности.

Теплопроводность

Теплопроводность – процесс выравнивания температур различных областей газа, обусловленный тепловым движением молекул.

Практика показывает, что при наличии в газе, жидкости или твёрдом теле разницы температур (градиента) со временем происходит её выравнивание по всему объёму. Поскольку температура характеризует среднюю кинетическую энергию молекул, то процесс выравнивания температуры сопровождается переносом энергии. Такой перенос энергии называется теплопроводностью.

Закон Фурье: поток тепла пропорционален градиенту температуры.

$$j_q = -K \frac{dT}{dx}, \quad (6.2)$$

где χ – коэффициент теплопроводности;

$\frac{dT}{dx}$ – градиент температуры.

Вязкость

Внутреннее трение (вязкость) – это процесс выравнивания скоростей различных слоев газа (жидкости), обусловленный хаотическим движением молекул. Сила F внутреннего трения пропорциональна площади S и изменению скорости на единицу длины в поперечном направлении dv/dz (градиенту скорости в направлении перпендикулярном движению) и зависит от свойств жидкости (рисунок 6.1):

$$F = \eta \left| \frac{dv}{dz} \right| \Delta S, \quad (6.3)$$

где η – коэффициент вязкости;

$\left| \frac{dv}{dz} \right|$ – градиент скорости.

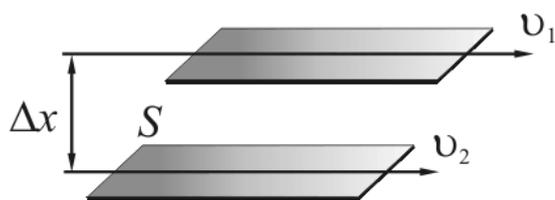


Рисунок 6.1 К определению силы внутреннего трения

РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ

Для реальных газов нужно учитывать размеры молекул и их взаимодействие друг с другом. Между молекулами вещества одновременно действуют силы притяжения и силы отталкивания.

Уравнение состояния реального газа (уравнение Ван-дер-Ваальса) для 1 моля газа:

$$\left(p + \frac{a}{V_0^2}\right)(V_0 - b) = RT, \quad (6.4)$$

где поправки a и b – постоянные для каждого газа величины, определяемые экспериментально.

Изотермы Ван-дер-Ваальса

Для исследования поведения реального газа рассмотрим изотермы Ван-дер-Ваальса – кривые зависимости P от V_m при заданных T , определяемые уравнением Ван-дер-Ваальса для моля газа. Эти кривые (рассматриваются для четырех различных температур (рис. 6.2).

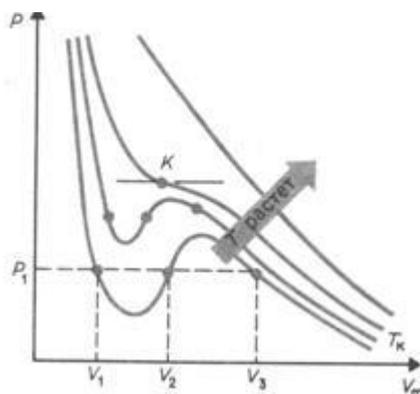


Рисунок 6.2 – Изотермы Ван-дер-Ваальса. <https://vikidalka.ru/1-47614.html>

Изотермы реального газа отличается от изотермы идеального газа только некоторым искажением ее формы, оставаясь монотонно спадающей кривой. При некоторой температуре T_k на изотерме имеется лишь одна точка перегиба K .

Эта изотерма называется критической, соответствующая ей температура T_k – критической температурой; точка перегиба K называется **критической**

точкой; в этой точке касательная к ней параллельна оси абсцисс.

Соответствующие этой точке объем V_k и давление P_k называются также критическими. Состояние с критическими параметрами (P_k , V_k , T_k) называется критическим состоянием.

Вещество в газообразном состоянии при температуре ниже критической называется паром, а пар, находящийся в равновесии со своей жидкостью, называется насыщенным.

Если через крайние точки горизонтальных участков семейства изотерм провести линию, то получится колоколообразная кривая (рис. 6.6), ограничивающая область двухфазных состояний вещества. Эта кривая и критическая изотерма делят диаграмму P , V_m под изотермой на три области: 1) под колоколообразной кривой располагается область двухфазных состояний (жидкость и насыщенный пар); 2) слева от нее находится область жидкого состояния; 3) справа – область пара.

Пар отличается от остальных газообразных состояний тем, что при изотермическом сжатии претерпевает процесс сжижения. Газ же при температуре выше критической не может быть превращен в жидкость ни при каком давлении.

ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Свойства зарядов

Заряд — это физическая величина, характеризующая меру участия тела в электромагнитном взаимодействии.

Только тело, обладающее зарядом, само может создавать электромагнитное поле, и только на такое тело электромагнитное поле может действовать.

Заряд обладает следующими свойствами:

Заряд тела не зависит от скорости его движения, то есть в любой системе отсчёта величина заряда данного тела одинакова. Это свойство называют **инвариантностью** заряда.

2. Полный заряд замкнутой системы тел не изменяется со временем при любых процессах (например, при химических или ядерных реакциях), то есть сохраняется. Таким образом, существует **закон сохранения заряда**, подобно тому, как существует закон сохранения энергии.

3. Существует два вида зарядов, условно называемых положительными и отрицательными, которые различаются по типу взаимодействия между ними: одноимённые заряды отталкиваются, а разноимённые притягиваются.

4. Заряд квантуется, то есть он равен целому числу элементарных зарядов (то есть кратен элементарному заряду — заряду электрона). Если заряд тела достаточно велик, то это свойство незаметно, но в принципе заряд тела не может быть равным дробному числу зарядов электрона.

$$Q = Ne, \quad (6.5)$$

где

Q — любой заряд;

N — число элементарных зарядов;

e — элементарный электрический заряд

Закон Кулона

Два неподвижных точечных заряда в вакууме действуют друг на друга с силой, пропорциональной произведению зарядов, обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними и действующей вдоль линии, соединяющей заряды:

$$F = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \quad (6.6)$$

где

k — некоторый коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора системы единиц. В системе СИ:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0}.$$

В векторной форме данный закон имеет вид:

$$\vec{F}_{12} = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^3} \cdot \vec{r}_{12}. \quad (6.7)$$

Здесь

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная,

ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость среды.

Заряд называется **точечным**, если размерами области, в которой он распределён, можно пренебречь, по сравнению с расстоянием до точки, в которой рассматривается действие этого заряда.

Чтобы рассчитать силу взаимодействия между двумя **протяжёнными** заряженными телами, необходимо разбить их на малые элементарные объёмы, каждый из которых можно считать точечным зарядом, и вычислить силу, с которой каждый участок одного тела действует на каждый участок другого, а затем найти результирующую силу как векторную сумму всех таких сил.

Напряжённость электрического поля

Для описания и исследования электрических полей в качестве индикатора наличия поля принято использовать единичный положительный точечный заряд, который будет называться **пробным**. О величине поля в исследуемой точке пространства судят по величине силы, действующей со стороны поля на этот заряд, помещённый в данную точку. И в качестве **силовой характеристики** поля вводят отношение силы, действующей со стороны поля на пробный заряд, к величине этого заряда. Введённая таким образом силовая характеристика поля называется **напряжённостью**.

Напряжённость электрического поля численно равна силе, действующей со стороны поля на помещённый в него единичный положительный точечный (пробный) заряд.

$$\vec{E} = \vec{F} / q_0 \quad (6.8)$$

Как видно из формулы, напряжённость является векторной величиной, и она направлена так же, как и сила, действующая на положительный пробный заряд, то есть от "ПЛЮСА" к "МИНУСУ".

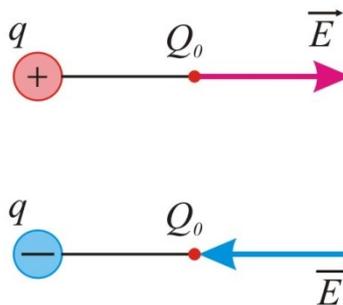


Рисунок 6.3 — Направление вектора электрического поля

Если электрическое поле создано одним **точечным** зарядом q , то согласно закону Кулона величина его напряжённости равна:

$$E = \frac{F}{q_0} = k \cdot \frac{q \cdot q_0}{q_0 \cdot r^2} = k \frac{q}{r^2} \quad (6.9)$$

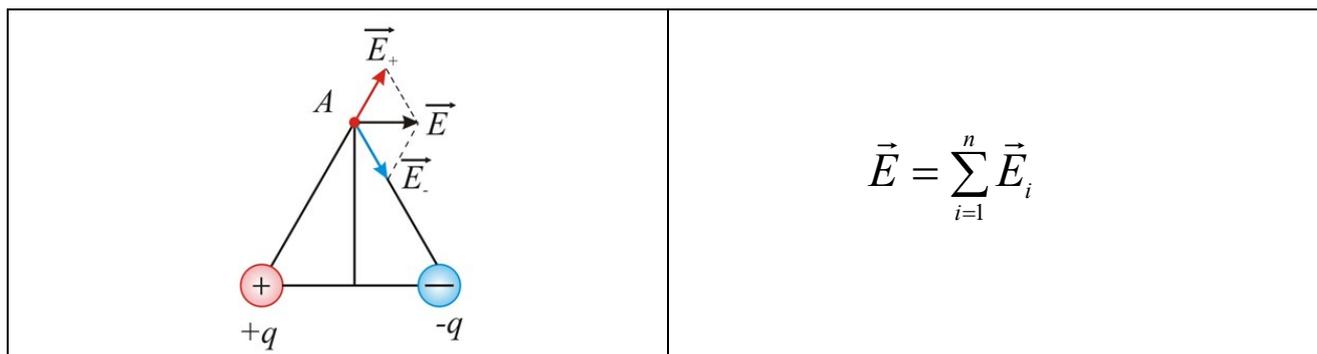
или

$$\vec{E} = k \frac{q}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r} = k \frac{q \cdot \vec{r}}{r^3} \quad (6.10)$$

Принцип суперпозиции полей

Если электрическое поле создано системой точечных зарядов, то напряжённость результирующего электрического поля в любой точке равна векторной сумме напряжённостей полей, созданных каждым точечным зарядом в данной точке по отдельности.

Это утверждение называют **принципом суперпозиции**. Оно равносильно утверждению о том, что множество действующих на тело сил можно заменить их равнодействующей.



Силовые линии

Для графического изображения полей Майкл Фарадей предложил ввести силовые линии или линии напряжённости. Эти линии проводятся так, чтобы в каждой точке поля его вектор напряжённости совпадает с касательной к силовой линии.

Свойства силовых линий таковы:

- силовые линии электростатического поля не пересекаются;
- они начинаются на положительных и заканчиваются на отрицательных зарядах. В случае системы одноименных зарядов силовые линии либо уходят на бесконечность, либо приходят из бесконечности.
- силовые линии проводятся тем гуще, чем больше напряжённость поля в данном месте.

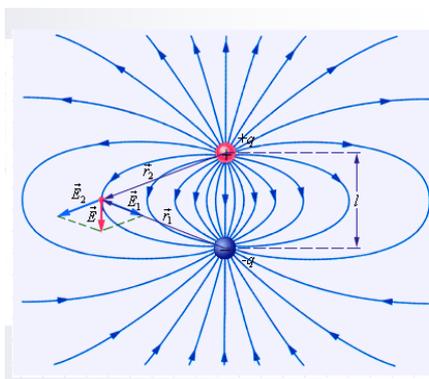


Рисунок 6.4 — Силовые линии поля, создаваемого двумя точечными разноименными зарядами. Взято с сайта <http://bourabai.kz/physics/electric.html>

**Теорема Остроградского-Гаусса и её применение к
расчету
электрических полей**

Эта теорема выведена математически для векторного поля любой природы русским математиком Остроградским (1801-1862), а затем независимо от него применительно к электростатическому полю — К. Гауссом. Подобная теорема существует и для электростатического поля. Для магнитного поля она звучит так:

Полный поток вектора напряжённости электрического поля *в вакууме* сквозь замкнутую поверхность произвольной формы численно равен алгебраической сумме зарядов, расположенных внутри поверхности, деленной на величину электрической постоянной:

$$\Phi = \int_S E_n dS = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \sum_{i=1}^n Q_i, \quad (6.11)$$

где

q_i — заряд, заключенный внутри поверхности;

n — число зарядов.

В общем случае заряд может быть распределен в объёме с некоторой объёмной плотностью зарядов:

$$\rho = \frac{dq}{dV}, \quad (6.12)$$

различной в различных местах пространства. Тогда теорема Остроградского-Гаусса записывается следующим образом:

$$\Phi = \int_S E_n dS = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV. \quad (6.13)$$