

Московский физико-технический институт  
(Государственный университет)  
Кафедра молекулярной физики

Физические методы исследования

## Лекция 12

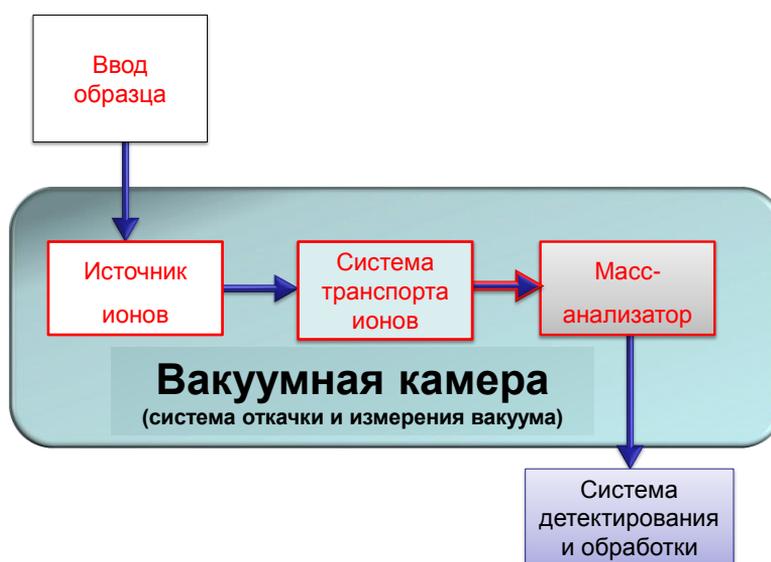
# Вакуумная техника в масс-спектрометрии

г. Долгопрудный, 23 ноября 2013г.

1

## Блок-схема масс-спектрометра

(Основные шаги при измерении масс-спектра)



## **Вакуумная техника. План**

- Проблема измерения давления
- Вакуум. Поддиапазоны вакуума
- Явления переноса. Течение газа
- Конструирование вакуумных систем
- Создание вакуума (откачка)
- Методы измерения пониженного давления
- Методы измерения и создания высоких давлений

3

### **Рекомендуемая литература по измерению давления и вакуумной технике**

- Д.В. Сивухин. Общий курс физики. Том 2. Молекулярная физика и термодинамика.
- Стариковская С.М. Физические методы исследования. Семинарские занятия. 3. Методы измерения давлений. Учебно-методическое пособие /М.: МФТИ, 2005.
- Розанов Л.Н. Вакуумная техника. М.: Высшая школа, 1990.
- Грошковский Я. Техника высокого вакуума. М.: Мир, 1975.
- Дэшман, С. Научные основы вакуумной техники : пер. с англ. / С. Дэшман . – М. : Мир, 1964 . – 715 с.
- А. Рот. Вакуумные уплотнения

4

## *Вакуит – пустота (лат.)*

В настоящее время термином вакуум принято называть любое пространство, заполненное газом, давление которого ниже атмосферного.

*Величина предельного разрежения, которое может быть достигнуто, измерено и поддержано в вакуумной камере, определяется основными характеристиками вакуумной системы, а также насосов, манометров и уплотнений, используемых в ней.*

5

**Области вакуума**

Вакуум	Хар-ка давления	Величина, Торр	Применение или типичная область существования
Атмосферное давление	Атмосферное	760	На поверхности Земли
Технический (низкий вакуум)	Пониженное	100-10	В газонаполненных лампах, на входе водяного струйного насоса, в технических вакуумных установках
Форвакуум (средний)	Форвакуумное 1 – 10 <sup>-3</sup> Торр	1 – 10 <sup>-2</sup>	В различных газоразрядных лампах, наполненных газами или парами
		10 <sup>-3</sup>	В металлургических печах
Высокий	Низкое 10 <sup>-4</sup> – 10 <sup>-7</sup> Торр	10 <sup>-4</sup>	В сосудах Дьюара
		10 <sup>-5</sup>	При вакуумном осаждении паров
		10 <sup>-6</sup>	В приемно-усилительных лампах, 200 км
		10 <sup>-7</sup>	В генераторных лампах
Очень высокий	Очень низкое 10 <sup>-8</sup> – 10 <sup>-11</sup> Торр	10 <sup>-8</sup> – 10 <sup>-9</sup>	В ускорителях частиц, в рентгеновских трубках, 600 км
		10 <sup>-10</sup> – 10 <sup>-11</sup>	В установках для исследования поверхностей
Сверх-высокий	Чрезвычайно низкое 10 <sup>-12</sup> – 10 <sup>-15</sup> Торр	10 <sup>-12</sup> – 10 <sup>-13</sup>	В специальных экспериментальных установках для исследования сверхвысокого вакуума
		10 <sup>-14</sup> – 10 <sup>-15</sup>	В космическом пространстве

6

## Режимы газовых течений

$\lambda_0 \ll \chi$	Вязкостный режим	Молекулы участвуют в процессах, в основном, за счет взаимных соударений
$\lambda_0 \gg \chi$	Молекулярный режим	Молекулы взаимодействуют, в основном, со стенками и с другими поверхностями
$\lambda_0 \sim \chi$	Промежуточный режим	Реализуются оба случая с соизмеримыми вкладами

$\chi$ - характерный размер сосуда

7

## Основы физики газа

В условиях пониженного давления хорошо работает приближение идеального газа

Идеальный газ  $PV = \frac{m}{\mu}RT$

Закон Дальтона  $P = \sum P_i$

Удобное понятие – количество газа

$$Q = P \cdot V = V \cdot \sum P_i = \left( \sum \frac{m_i}{\mu_i} \right) RT$$

8

## Длина свободного пробега

Средняя длина свободного пробега –  $\lambda_0 = \frac{1}{\sqrt{2}n\sigma}$

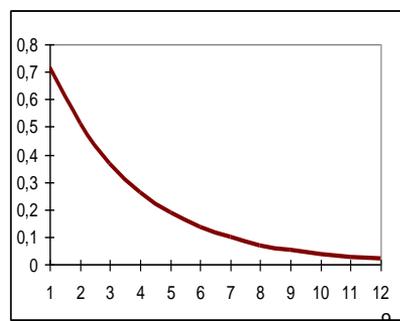
Распределение длины свободного пробега :

$$P\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right) = P' \exp\left\{-\frac{\lambda}{\lambda_0}\right\}$$

При  $\lambda=0,1 \lambda_0$  таких частиц  $\sim 0,9 \cdot N$

При  $\lambda= \lambda_0$  таких частиц  $\sim 0,37 \cdot N$

При  $\lambda= 3\lambda_0$  таких частиц  $\sim 0,05 \cdot N$



## Зависимость средней длины свободного пробега от давления и температуры

$$\lambda_0 = \frac{1}{\sqrt{2}n\sigma} = \frac{kT}{\sqrt{2}p\sigma} \quad \text{т.е. для идеального газа } \lambda_0 \text{ не зависит от } P \text{ и } T$$

От них зависит сечение, точнее говоря, оно зависит от температуры

$$\sigma_{0T} = \sigma_0 \left(1 + \frac{T_\lambda}{T}\right) \Rightarrow \lambda_{0T} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d_0^2 n} \frac{1}{1 + \frac{T_\lambda}{T}}$$

$T_\lambda$  - Постоянная Сазерленда или температура удвоения (т.е. температура, при которой удваивается эффективное сечение частицы  $\sigma_{0T}=2\sigma_0$ )

$$\frac{\lambda_{0T}}{\lambda_{0,T=273}} = \frac{1 + \frac{T_\lambda}{T_{н.у.}}}{1 + \frac{T_\lambda}{T}}$$

Постоянная Сазерленда для разных газов	
газ	$T_\lambda$ , K
Ne	56
He	80
N <sub>2</sub>	102
Воздух	112
O <sub>2</sub>	110
Xe	252
H <sub>2</sub> O	472

10

## Явления переноса в газе

Перенос массы – диффузия

Перенос импульса – динамическая вязкость

Перенос энергии - теплопроводность

*Явления переноса и их характер зависят от условий, в которых находится газ (вязкостных, молекулярных и т.д.).*

*Кроме того, важны характеристики газов (форма молекулы и т.д.), свойства поверхностей и т.п.*

11

## Диффузия

$$\frac{dn_a}{d\tau} = -D_{ab} \frac{dn_a}{dx}$$

$$\frac{dn_b}{d\tau} = -D_{ba} \frac{dn_b}{dx}$$

$$p_a + p_b = \text{const} \Leftrightarrow n_a + n_b = \text{const}$$

$$\frac{dn_a}{dx} = -\frac{dn_b}{dx}, \quad \frac{dn_a}{d\tau} = -\frac{dn_b}{d\tau}$$

$$D_{ba} = D_{ab} = D$$

12

## Коэффициент диффузии

$$D_a = \frac{1}{3} v_a \lambda_{0a}$$

$$D_b = \frac{1}{3} v_b \lambda_{0b}$$

$$D_{ba} = D_{ab} = D_a \frac{n_a}{n_a + n_b} + D_b \frac{n_b}{n_a + n_b}$$

Но, если учесть распределение Максвелла, то:

$$D = \frac{1}{3} \xi v \lambda_0$$

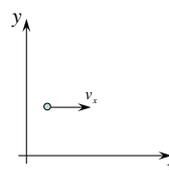
$$D = 2,2 \cdot 10^{-16} \frac{1}{d_0^2 \sqrt{M_0}} \frac{T^{3/2}}{p} \left[ \frac{\text{см}^2}{\text{с}}, \text{см}, \text{г} / \text{моль}, \text{К}, \text{Торр} \right]$$

13

## Вязкость

Сила сопротивления пропорциональна поверхности и градиенту скорости:

$$F_+ = -\eta \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)$$



$\eta$  - коэффициент динамической вязкости, измеряется в Пуазах

[1 Пз = 1 г / (см \* сек)]

$$\eta = \frac{1}{2} m_0 n v \lambda_0$$

14

## Элементы вакуумных систем

- Сосуды
- Трубопроводы
- Краны и заслонки
- Средства измерений
  - Измерение давления
  - Измерение расходов и потоков
  - Контроль состава газовой среды
  - Контроль течей
- Средства откачки
- Системы напуска газа
- Вспомогательные элементы

15

### Течение газа

#### А. Поток газа.

Количество газа (в единицах PV), протекающего через сечение в единицу времени

$$I = \frac{dQ}{d\tau} = p \left( \frac{dV}{d\tau} \right)_p, \left[ \frac{\text{Торр}\cdot\text{л}}{\text{сек}} \right]$$

#### Б. Объемная скорость течения.

$$S = \left( \frac{dV}{d\tau} \right)_p, \left[ \frac{\text{л}}{\text{сек}} \right]$$

$$I = Sp$$

16

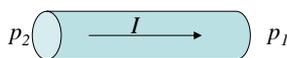
### Проводимость элемента вакуумной системы

$$G = \frac{I}{p_2 - p_1}$$

$$p_1 = 0 \Rightarrow G = \frac{I}{P} = S$$

Сопротивление:

$$W = \frac{1}{G}$$



Соединение элементов:

Параллельное:

$$G = G_1 + G_2 + \dots + G_n = 1/W_1 + 1/W_2 + \dots$$

Последовательное:

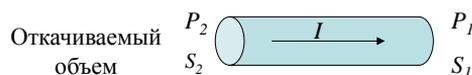
$$W = W_1 + W_2 + \dots + W_n = 1/G_1 + 1/G_2 + \dots$$

17

### Объемная скорость истечения газа на выходе из трубопровода

$$I = G(p_2 - p_1)$$

Массовый баланс



$$I = p_1 S_1 = p_2 S_2$$

$$p_2 - p_1 = \frac{I}{G}$$

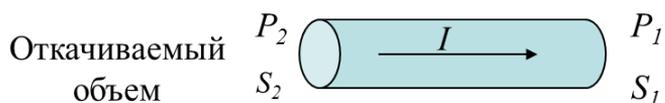
$$p_2 = \frac{I}{S_2}; p_1 = \frac{I}{S_1}$$

$$\frac{1}{G} = \frac{1}{S_2} - \frac{1}{S_1}$$

$$S_1 = S_2 \frac{1}{1 - \frac{S_2}{G}}$$

18

### Объемная скорость истечения газа на выходе из трубопровода



$$\frac{1}{G} = \frac{1}{S_2} - \frac{1}{S_1}$$

$$S_1 = S_2 \frac{1}{1 - \frac{S_2}{G}}$$

**Выводы:**

$S_2 < S_1$  всегда, кроме случая  $G = \infty$  (абсолютной проводимости);

И поэтому насос всегда должен быть как можно ближе к откачиваемому объему

19

### Проводимость отверстия в молекулярных условиях

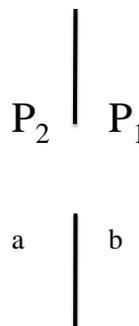
$$f'_b = \frac{1}{4} n_2 v_{ap} = \frac{1}{4} \frac{p_2}{kT} v_{ap}$$

$$f'_a = \frac{1}{4} n_1 v_{ap} = \frac{1}{4} \frac{p_1}{kT} v_{ap}$$

$$f' = f'_b - f'_a = \frac{1}{4} \frac{v_{ap}}{kT} (p_2 - p_1)$$

$$I = \frac{1}{4} A_0 (p_2 - p_1) v_{ap}$$

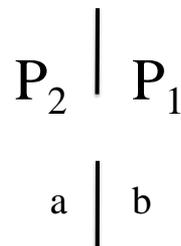
$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(PV)}{dt} = RT \frac{dV}{dt} = RT \cdot f_M$$



$$f' = f'_b - f'_a = \frac{1}{4} \frac{v_{ap}}{kT} (p_2 - p_1)$$

$$I = \frac{1}{4} A_0 (p_2 - p_1)$$

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(PV)}{dt} = RT \frac{d\nu}{dt} = RT f_M$$



$$G_0 = \frac{1}{4} v_{ap} A_0 = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{8kT}{\pi\mu}} A_0 = A_0 \sqrt{\frac{kT}{2\pi\mu}}$$

$$G_0 \approx 3.65 \cdot A_0 \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad \text{-[л/сек, К, г/моль, см²]}$$

$$G_0 \approx 11.6 \cdot A_0 \quad \text{-Воздух, T=293К}$$