

Московский физико-технический институт  
(Государственный университет)  
Департамент молекулярной и биологической физики

**Физические методы исследования**

Лекция 4

## **Измерение давления Принципы создания вакуумных систем**

г. Долгопрудный, 9 марта 2017г.

Лекции будут доступны в том числе и здесь:



[https://drive.google.com/drive/folders/0B\\_4u1a\\_RllwwYXdING93N05QM2s?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/0B_4u1a_RllwwYXdING93N05QM2s?usp=sharing)

# **Измерение давления и основы вакуумной техники**

## **План**

- Проблема измерения давления
- Вакуум. Поддиапазоны вакуума
- Явления переноса. Течение газа
- Создание вакуума
- Конструирование вакуумных систем
- 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



# Давление



**Отто фон Герике**  
1602-1686



- Получение вакуума (независимо от Торричелли)
- Воздушная машина (Вакуумный насос)
- Открытие упругости воздуха
- Магденбургский эксперимент
- Статический барометр (Бароскоп)
- Исследование теплопроводности воздуха

7



**Отто фон Герике**  
1602-1686

# Давление

Определение  $P = \frac{E}{V} = \frac{F}{S} = \frac{mv}{St}$

Единицы измерения  $1 \text{ Атм} = 760 \text{ Торр} \approx 10^5 \text{ Па}$

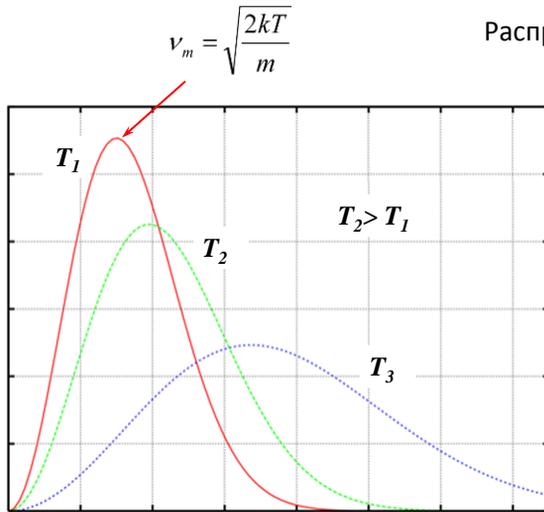
Диапазон  $10^{-12} \text{ Торр} \div 10^5 \text{ Атм}$

9

## Единицы измерения давления

	Паскаль (Pa, Па)	Бар (bar, бар)	Техническая атмосфера (at, ат)	Физическая атмосфера (atm, атм)	Миллиметр ртутного столба (мм рт.ст., Торр, Торр)	Метр водяного столба (м вод. ст., м H <sub>2</sub> O)	Фунт-сила на кв. Дюйм (psi)
<b>1 Па</b>	<b>1 Н/м<sup>2</sup></b>	10 <sup>-5</sup>	10,197×10 <sup>-6</sup>	9,8692×10 <sup>-6</sup>	7,5006×10 <sup>-3</sup>	1,0197×10 <sup>-4</sup>	145,04×10 <sup>-6</sup>
<b>1 бар</b>	105	<b>1×10<sup>6</sup> дин/см<sup>2</sup></b>	1,0197	0,98692	750,06	10,197	14,504
<b>1 ат</b>	98066,5	0,980665	<b>1 кгс/см<sup>2</sup></b>	0,96784	735,56	10	14,223
<b>1 атм</b>	101325	1,01325	1,033	<b>1 атм</b>	760	10,33	14,696
<b>1 мм рт.ст.</b>	133,322	1,3332×10 <sup>-3</sup>	1,3595×10 <sup>-3</sup>	1,3158×10 <sup>-3</sup>	<b>1 мм рт.ст.</b>	13,595×10 <sup>-3</sup>	19,337×10 <sup>-3</sup>
<b>1 м вод. ст.</b>	9806,65	9,8066×10 <sup>-2</sup>	0,1	0,096784	73,556	<b>1 м вод. ст.</b>	1,4223
<b>1 psi</b>	6894,76	68,948×10 <sup>-3</sup>	70,307×10 <sup>-3</sup>	68,046×10 <sup>-3</sup>	51,715	0,70307	<b>1 lbf/in<sup>2</sup></b>

10



Распределение Максвелла

$$\frac{dN}{N}(v, v + dv) = f(v)$$

$$f(v) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{m}{2kT} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right)$$

$$\bar{v} = \int v f(v) dv = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$$

$$\overline{v^2} = \int v^2 f(v) dv = \frac{3kT}{m}$$

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT$$

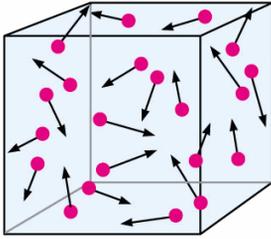
11

## Вакуум – пустота (лат.)

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

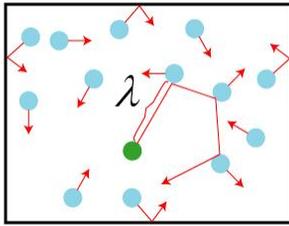
**Величина предельного разрежения, которое может быть достигнуто, измерено и поддержано в вакуумной камере, определяется основными характеристиками вакуумной системы, а также насосов, манометров и уплотнений, используемых в ней.**

12



Средняя длина свободного пробега молекулы газа обратно пропорциональна концентрации молекул газа, т.е. для данной температуры она обратно пропорциональна величине давления:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2n\sigma}} \quad \lambda = \frac{k}{p}$$



где давление измеряется в Торрах, длина свободного пробега измеряется в сантиметрах, тогда коэффициент  $k$  в этом уравнении будет численно равняться длине свободного пробега молекулы в сантиметрах при давлении  $10^{-3}$  Торр.

13

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2n\sigma}}$$

$$\lambda = \frac{k}{p}$$

$P$  - в Торрах,  
 $\sigma$  - в сантиметрах  
 $k$  – длина св. пробега в см при  
 $P=10^{-3}$  Торр

Значения коэффициента  $k$   
(см\* $10^{-3}$  Торр) при температуре  
 $20^{\circ}\text{C}$  для различных газов:

Газ	$k$
Ксенон	3,00
Пары воды	3,40
$\text{CO}_2$	3,34
Хлор	3,47
Криптон	4,05
Аргон	5,07
Азот	5,1
Воздух	5,1
Кислород	5,4
Пары ртути	6,3
Водород	9,3
Неон	10,4
Гелий	14,6

14

## Какой бывает вакуум?

Время пребывания частицы на поверхности зависит от свойств газа и характеристик поверхности (материала, способа обработки поверхности, степени заполнения поверхности газом и т.д. и т.п.)

$$\tau_{np} = \tau_{np,0} \exp \left\{ \frac{W_{дес}}{R_0 T_s} \right\}$$

$W_{дес}$  – энергия связи ([Эрг/моль, Дж/кмоль])

$R_0 = 8,32 \cdot 10^7$  Эрг/(моль·К) или  $R_0 = 8314$  Дж/(моль·К)

$T_s$  – температура поверхности

$T_{np,0}$  – период колебаний молекулы (атома) на поверхности твердого адсорбата в направлении, перпендикулярном поверхности, измеряем в секундах

**Получается:**

1) Когда температура равна нулю, время пребывания частицы на поверхности равно бесконечности, а в свою очередь, давление в сосуде равно нулю, газа попросту в сосуде нет

2) При нагревании сосуда время пребывания уменьшается, и, следовательно, пространство заполняется молекулами газа и давление растет

15

### Время полного покрытия поверхности.

Частота соударений со стенкой:  $f = \frac{1}{4} n v_{ар} \sim \frac{1}{\sqrt{M_0}} \frac{p}{\sqrt{T}}$

$$\tau_{покр} = \frac{N_{1,покр}}{f'_{1,эфф}}$$

Если ввести размерность (Торр, Кельвин, г/моль) и константу связывания  $\gamma$ , то частота соударений со стенкой:

$$f = 3,5 \cdot 10^{22} \frac{\gamma}{\sqrt{M_0}} \frac{p}{\sqrt{T}}$$

$$\tau_{покр} = \frac{N_{1,покр}}{f'_{1,эфф}} = \frac{N_{1,покр}}{3,5 \cdot 10^{22}} \frac{\sqrt{M_0}}{\gamma} \frac{\sqrt{T}}{p} \approx 0,28 \cdot 10^{-22} N_{1,покр} \frac{\sqrt{M_0}}{\gamma} \frac{\sqrt{T}}{p}$$

Если для газов с  $M_0 = 30$  (т.е. почти для воздуха) при температуре  $T = 300$ К принять:

$\gamma$  (коэффициент прилипания)  $\gamma = 0,5$  – среднее значение для кислорода между 0 и 1 и  $N_{1,покр} = 10^{15}$ ,  $N_{1,покр}$  – число свободных мест, то тогда время полного покрытия поверхности при атмосферном давлении окажется чрезвычайно малым, а при давлении  $10^{-12}$  Торр составит примерно два месяца.

16

## 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

17

## 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
Сверх-высокий	Очень низкое 10 <sup>-8</sup> – 10 <sup>-12</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
Ультра-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

18

## 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

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

19

## Длина свободного пробега

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

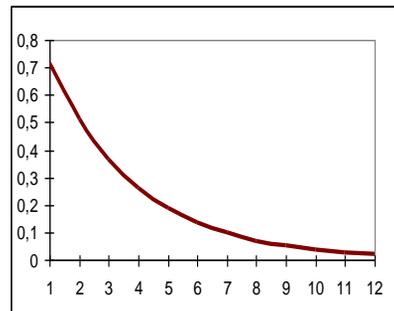
## Распределение длины свободного пробега

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

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  $\sim 0,05 \cdot N$



20

### 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	$T_\lambda$ , К
Ne	56
He	80
N <sub>2</sub>	102
Воздух	112
O <sub>2</sub>	110
Xe	252
H <sub>2</sub> O	472

21

## 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.*

22

## Диффузия

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

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

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

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

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

23

### 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:

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

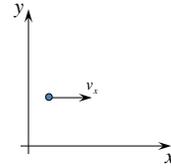
$$D = 2,2 \cdot 10^{-16} \frac{1}{d_0^2 \sqrt{M_0}} \frac{T^{3/2}}{p}, \left[ \frac{\text{см}^2}{\text{с}}, \text{см}, \text{г / моль}, \text{К}, \text{Торр} \right]$$

24

## 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=1г/(см\*сек)]

$$\eta = \frac{1}{3} m_0 n v \lambda_0$$

25

## 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

26

### 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

### Число Кнудсена

$$Kn = \frac{\chi}{\lambda_0}$$

$Kn \gg 1$  – вязкостный режим

$Kn \ll 1$  – молекулярный режим

$Kn \sim 1$  – промежуточный режим

27

### 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.

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

$$I = Sp$$

28

### 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:

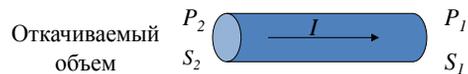
$$W = W_1 + W_2 + \dots + W_n = 1/G_1 + 1/G_2 + \dots$$

29

### Объемная скорость истечения газа на выходе из трубопровода

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

Массовый баланс



$$I = p_1 S_1 = p_2 S_2$$

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

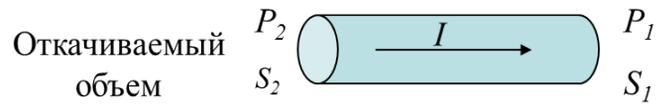
$$p_2 = \frac{I}{S_2}; p_1 = \frac{I}{S_1}$$

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

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

30

### 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

31