


# Физика разряженных газов (физика вакуума)



Вакуумом называют состояние газа или пара при давлении ниже атмосферного. Количественной характеристикой вакуума служит абсолютное давление (разница между атмосферным и вакуумным).

**Вакуумная техника** – прикладная наука, рассматривающая проблемы изучения и поддержания вакуума, а так же вопросы разработки конструирования и применение вакуумных систем и их элементов.

Вакуум бывает: низкий; средний; высокий; сверхвысокий.

## **Низкий вакуум**

Характеризуется давлением газа, при котором средняя длина пробега молекул значительно меньше характерного линейного размера сосуда. Эта область давлений от 10 до 100 МПа.

## **Средний вакуум**

Характеризуется давлением газа, при котором средняя длина пробега молекул приблизительно равна характерному линейному размеру сосуда. Эта область давлений от 100 до 0,1 МПа.

Низкий и средний вакуум используются в осветительных приборах.


## **Высокий вакуум**

Характеризуется давлением газа, при котором средняя длина пробега молекул значительно больше характерного линейного размера сосуда. Эта область давлений от 0,1 до 10 МПа.

Высокий – используется в приемно-усилительных генераторных лампах.

## **Сверхвысокий вакуум**

Характеризуется давлением газа, при котором не происходит заметного изменения свойств поверхности первоначально свободной от абсорбирующего газа за время, существующее для рабочего процесса.



Сверхвысокий вакуум используется в металлургии (плавка и переплавка в вакууме) для получения различных сплавов, для получения сверхчистых веществ, полупроводников, диэлектриков и т. д.; кристаллизация (искусственные сапфиры); диффузионная сварка (для соединения деталей из металлов с сильно различающимися температурами плавления).

## **Где используется вакуумная техника**

**Электротехническая промышленность.** производство кабелей, электродвигателей с использованием вакуумной пропитки.

**Оптическая промышленность** – производство зеркал (вакуумное алюминирование), просветленная оптика, производство биноклей, очков и т. д.

Интенсивность протекания физико-химических процессов в вакууме зависит от соотношения между числом столкновения молекул газа со стенками ограничивающего сосуда и числом взаимных столкновений молекул, характеризуется отношением средней длины свободного пути молекул к характерному размеру сосуда. Это число называется числом Кнудсена.

$$\text{Kn} = \frac{\bar{L}}{l}$$

где:  $\bar{L}$  – средняя длина свободного пути молекулы;  $l$  – характерный размер сосуда.

На основании числа Кнудсена идет деление по степеням вакуума. Степень вакуума определяется равновесным давлением, которое устанавливается в откачиваемом объеме под действием противоположных процессов, откачки газа насосом и поступления газа в объем за счет натекания через неплотности диффузионных и технологических газовыделений и проницаемости газа через стенки сосуда.



## 1.2. Давление в вакууме

Основой физики вакуума являются следующие постулаты:

1. Газ состоит из отдельных, движущихся молекул.
2. Существует постоянное распределение молекул газа по скоростям, т. е. одной и той же скоростью обладает всегда одинаковое число молекул.
3. При движении молекул газа нет преимущественных направлений, пространство газовых молекул изотропно.
4. Температура газа величина пропорциональная средней кинетической энергии его молекул.
5. При взаимодействии с поверхностью твердого тела молекула газа поглощается.

**Газ** – состояние вещества, при котором движение молекул практически неограниченно межмолекулярными силами и занимает весь объем.

**Давление в точке газового пространства** – отношение скорости переноса нормальной составляющей количества движения.

При взаимодействии газа с поверхностью твердого тела нормальная составляющая изменения количества движения молекулы будет равна:

$$m \cdot v \cdot \cos\theta$$

где  $\theta$  – угол между нормалью поверхности и вектором скорости;  $v$  – скорость молекулы;  $m$  – масса молекулы.

Согласно второму закону Ньютона, давление молекулы на поверхность:

$$P = \frac{\Delta K}{\Delta F \cdot \Delta t} = \frac{2 \cdot m \cdot v \cdot \cos\theta}{\Delta F \cdot \Delta t} \quad (1.1)$$

Где:  $\Delta t$  – время взаимодействия молекулы с поверхностью;  $\Delta F$  – площадь поверхности.

Число молекул в элементарном объеме  $dV$ , движущихся в направлении площадки  $\Delta F$ , пропорционально согласно третьему постулату, пропорционально телесному углу  $dW$ , под которым из центра  $dV$  видна площадка  $\Delta F$ .

$$dN = n \frac{dW}{4\pi} dV$$

Телесный угол

$$dW = \frac{\cos\theta \cdot \Delta F}{r^2}$$

где  $r$  – расстояние между выделенным объектом и поверхностью.

Объем в полярной системе координат:

$$dV = r \cdot \sin\theta \cdot d\varphi \cdot d\theta \cdot r \cdot dr$$

С учетом формулы 1.1. получаем

$$P = \int_{\dot{V}} \frac{2m \cdot v \cos \theta}{\Delta F \cdot \Delta t} \cdot dN$$



Подставляя (1.2), (1.3), (1.4) в (1.5), получим:

$$P = \frac{nmv}{2\pi\Delta t} \cdot \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{2/\pi} \cos^2\theta \cdot \sin\theta \cdot d\theta \int_0^R dr = \frac{nmv^3}{3}$$

где  $n$  – молекулярная концентрация.

Согласно постулату 2, введем вместо постоянной среднеквадратичную скорость молекулы.

$$v_{\text{КВ}}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^2$$

тогда

$$P = nmv_{\text{КВ}}^2/3$$

Учитывая, что плотность газа  $\rho = nm$ , получим

$$P = \frac{\rho v_{KB}^2}{3}$$

Условия равновесия, использованные при выводе уравнения могут, не выполняться, например, в случае конденсирующей поверхности, с которой из-за очень большого времени адсорбции не происходит десорбция молекул газа, и наоборот, тело в космическом пространстве десорбирует молекулы с поверхности, а количеством молекул ударяющихся об это тело, можно пренебречь. В этих случаях необходимо точно знать соотношение потоков падающих и вылетающих молекул газа.

## Газовые законы

Если в объеме находится смесь из  $K$  газов, то давление смеси:

$$P_{\text{см}} = \sum_{i=1}^K \frac{1}{3} m_i \cdot v_{\text{кв}i}^2 \cdot n_i$$

Закон Дальтона

$$P_{\text{см}} = \sum_{i=1}^K P_i$$

Так как температура, согласно 4 постулату, пропорциональна кинетической энергии молекулы, можно записать ,

$$\frac{mv_{\text{KB}}^2}{2} = cT$$

где  $c$  – некоторая постоянная.

Тогда (1.7) можно записать в виде:

$$P = \frac{2}{3}ncT$$

Обозначим

$$k = \frac{2}{3}c$$

Тогда

$$P = nkT$$

а средняя кинетическая энергия молекулы:

$$\frac{mv_{\text{KB}}^2}{2} = \frac{2}{3}kT$$

Уравнение (1.10) называют уравнением газового состояния, оно связывает три основных параметра: давление, молекулярную концентрацию и температуру. Константа  $k=1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/к – постоянная Больцмана.

Уравнение (1.10) также можно представить в виде:

$$P = \frac{Nm}{VM} \cdot RT$$

где  $M$  – молекулярная масса газа;  $V$  – объём газа;  $N_A = M/m = 6.02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> – число Авагадро;  $R = kN_A = 8.31 \cdot 10^3$ , Дж/Кмоль – универсальная газовая постоянная.