

Московский Физико-Технический Институт  
(государственный университет)

---

## Исследование взаимной диффузии газов

---

Сибгатуллин Булат, ФРКТ



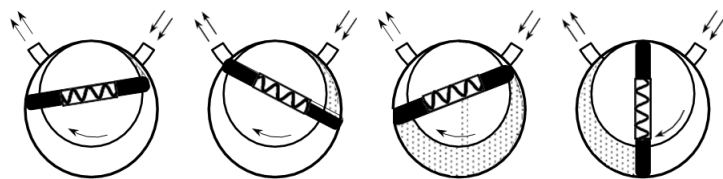


Рис. 2. Схема действия ротационного двухпластинчатого форвакуумного насоса. В положениях «а» и «б» пластина «А» засасывает разреженный воздух из откачиваемого объема, а пластина «Б» вытесняет ранее захваченный воздух в атмосферу. В положениях «в» и «г» пластины поменялись ролями

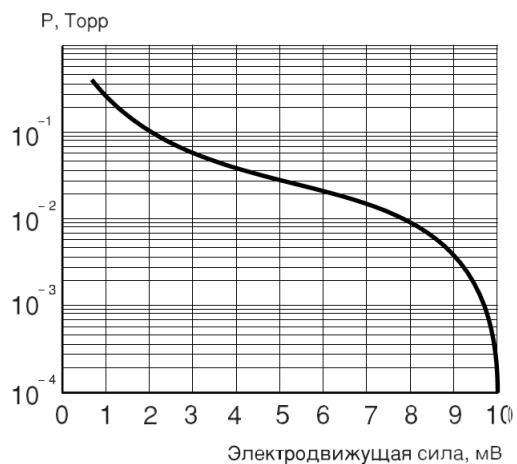


Рис. 5. Градуировочная кривая термопары ЛТ-2

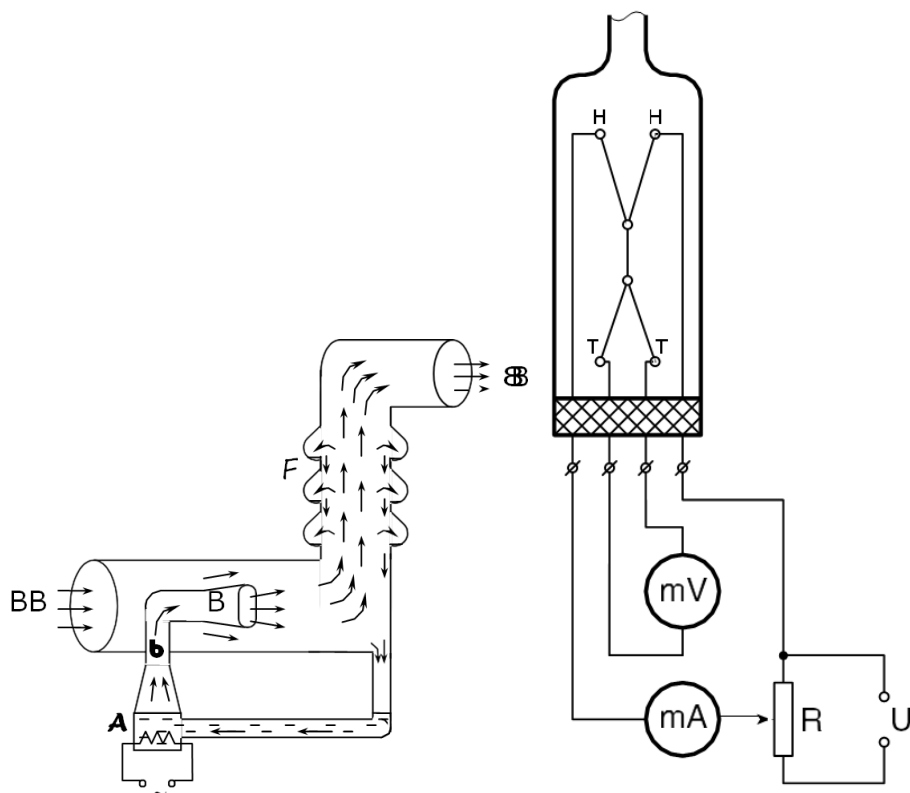


Рис. 3. Схема работы диффузионного насоса

Рис. 4. Схема термопарного манометра с лампой ЛТ-2

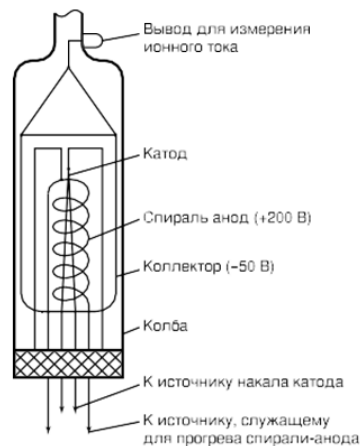


Рис. 6. Схема ионизационной лампы ЛМ-2

**Процесс откачки.** Производительность насоса определяется скоростью откачки  $W$  (л/с):  $W$  — это объем газа, удаляемого из сосуда при данном давлении за единицу времени. Скорость откачки форвакуумного насоса равна емкости воздухозаборной камеры, умноженной на число оборотов в секунду. Рассмотрим обычную схему откачки. Разделим вакуумную систему на две части: «откачиваемый объем» (в состав которого включим используемые для работы части установки) и «насос», к которому, кроме самого насоса, отнесем трубопроводы и краны, через которые производится откачка нашего объема. Обозначим через  $Q_d$  количество газа, десорбирующегося с поверхности откачиваемого объема в единицу времени, через  $Q_i$  — количество газа, проникающего в единицу времени в этот объем извне — через течи. Будем считать, что насос обладает скоростью откачки  $W$  и в то же время сам является источником газа; пусть  $Q_n$  — поток газа, поступающего из насоса назад в откачиваемую систему. Будем измерять количество газа  $Q_d$ ,  $Q_i$  и  $Q_n$  в единицах  $PV$  (легко видеть, что это произведение с точностью до множителя  $RT/\mu$  равно массе газа). Основное уравнение, описывающее процесс откачки, имеет вид

$$-VdP = (PW - Q_d - Q_n - Q_i)dt$$

Левая часть этого уравнения равна убыли газа в откачиваемом объеме  $V$ , а правая определяет количество газа, уносимого насосом, и количество прибывающего вследствие перечисленных выше причин за время  $dt$ . При достижении предельного вакуума (давление  $P_{pr}$ )

$$\frac{dP}{dt} = 0$$

$$W = \frac{\sum Q_i}{P_{pr}}$$

Обычно  $Q_i$  постоянно, а  $Q_n$  и  $Q_d$  слабо зависят от времени, поэтому в наших условиях все эти члены можно считать постоянными. Считая также постоянной скорость откачки  $W$ , уравнение (1) можно проинтегрировать и, используя (2), получить

$$P = P_o \exp\left(-\frac{W}{V}t\right) + P_{pr}$$

**Течение газа через трубу.** Характер течения газа существенно зависит от соотношения между размерами системы и длиной свободного пробега молекул. При атмосферном давлении и даже при понижении давления до форвакуумного длина свободного пробега меньше диаметра трубок и течение откачиваемого газа определяется его вязкостью, т. е. взаимодействием его молекул. При переходе к высокому вакууму картина меняется. Столкновения молекул между собой начинают играть меньшую роль, чем соударения со стенками. Течение газа в трубе напоминает в этих условиях диффузию газа из области больших концентраций в области, где концентрация ниже, причем роль длины свободного пробега играет ширина трубы. Для количества газа, протекающего через трубу в условиях высокого вакуума или, как говорят, в кнудсеновском режиме, справедлива формула

$$\frac{d(PV)}{dt} = \frac{4}{3}r^3 \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \frac{P_2 - P_1}{L}$$

Применим эту формулу к случаю, когда труба соединяет установку с насосом. Пренебрежем давлением  $P_1$  у конца, обращенного к насосу. Будем измерять количество газа, покидающего установку при давлении  $P = P_2$ . Пропускная способность трубы

$$C_{tr} = \left(\frac{dV}{dt}\right)_{tr} = \frac{4}{3} \frac{r^3}{L} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}}$$

Мы видим, что пропускная способность зависит от радиуса трубы в третьей степени и обратно пропорциональна ее длине. В вакуумных установках следует поэтому применять широкие короткие трубы.

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_n} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots$$

При расчете вакуумных систем нужно принимать во внимание также пропускную способность отверстий, например, в кранах. Для них имеется формула

$$\eta = \frac{1}{4} S n \langle v \rangle$$

где  $\eta$  — число молекул, вылетающих из отверстия в вакуум в единицу времени,  $S$  — площадь отверстия,  $n$  — концентрация молекул перед отверстием,  $\langle v \rangle$  — средняя скорость молекул газа. С другой стороны,  $\eta = dN/dt$ ,  $N = PV/kT$ ,  $n = P/kT$ , и аналогично формуле для количества газа, покидающего установку при давлении  $P$ , получается пропускная способность отверстия

$$C_{otv} = \left(\frac{dV}{dt}\right)_{otv} = S \frac{\langle v \rangle}{4}$$

Для диффузионного насоса можно считать, что каждая молекула воздуха, попавшая в кольцевой зазор между соплом и стенками насоса, увлекается струей пара и не возвращается обратно в откачиваемый объем. Скорость откачки такого насоса можно считать равной пропускной способности отверстия с площадью, равной площади кольцевого зазора, т. е. насос качает как кольцевой зазор, с одной стороны которого расположен откачиваемый объем, а с другой — пустота.