

Лаборатория Работа 2.3.1

Получение и измерение вакуума

Сифат Мд Абдуллах Ал Хасиб

Физтех школа электроники, фотоники и молекулярной физики

Группа Б04-105

6 апреля 2022 г.

1 Введение

Цель работы: 1) измерение объемов форвакуумной и высоковакуумной частей установки; 2) определение скорости откачки системы в стационарном режиме, а также по ухудшению и по улучшению вакуума.

В работе используется: вакуумная установка с манометрами: масляным, термопарным и ионизационным. По степени разряжения вакуумные установки принято делить на три класса: 1) низковакуумные – до 10^{-2} - 10^{-3} торр; 2) высоковакуумные – 10^{-4} - 10^{-7} торр; 3) установки сверхвысокого вакуума – 10^{-8} - 10^{-11} торр. С физической точки зрения низкий вакуум переходит в высокий, когда длина свободного пробега молекул газа оказывается сравнима с размерами установки; сверхвысокий вакуум характерен крайней важностью процессов адсорбции частиц на поверхности вакуумной камеры.

2 Теоретическая справка

2.1 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/μ равно массе газа). Основное уравнение, описывающее процесс откачки, имеет вид

$$-VdP = (PW - Q_d - Q_n - Q_i)dt. \quad (1)$$

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})

$$\frac{dP}{dt} = 0, \quad (2)$$

$$W = \frac{\sum Q_i}{P_{pr}}. \quad (3)$$

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

$$P = P_o \exp\left(-\frac{W}{V}t\right) + P_{pr}. \quad (4)$$

2.2 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

$$\frac{d(PV)}{dt} = \frac{4}{3}r^3 \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \frac{P_2 - P_1}{L}. \quad (5)$$

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

$$C_{tr} = \left(\frac{dV}{dt}\right)_{tr} = \frac{4}{3} \frac{r^3}{L} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}}. \quad (6)$$

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.

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

3 Модель эксперимента

1. Определим объемы форвакуумной и высоковакуумной частей установки. Сначала впустим атмосферу в установку. Запрем воздух при комнатных условиях в капилляре между кранами 5 и 6. После этого откачаем воздух из оставшейся части установки (сделав это в два этапа - сначала насос должен откачать сам себя, а только потом - установку). После этого мы сначала высвободим запертый воздух только в ФВ часть, а затем добавим к ней и ВВ. Тогда записав уравнение Менделеева-Клапейрона и зная объем капилляра, мы найдем объемы соответствующих частей установки:

$$P_0 V_0 = P_v (V_f + V_v), \quad (7)$$

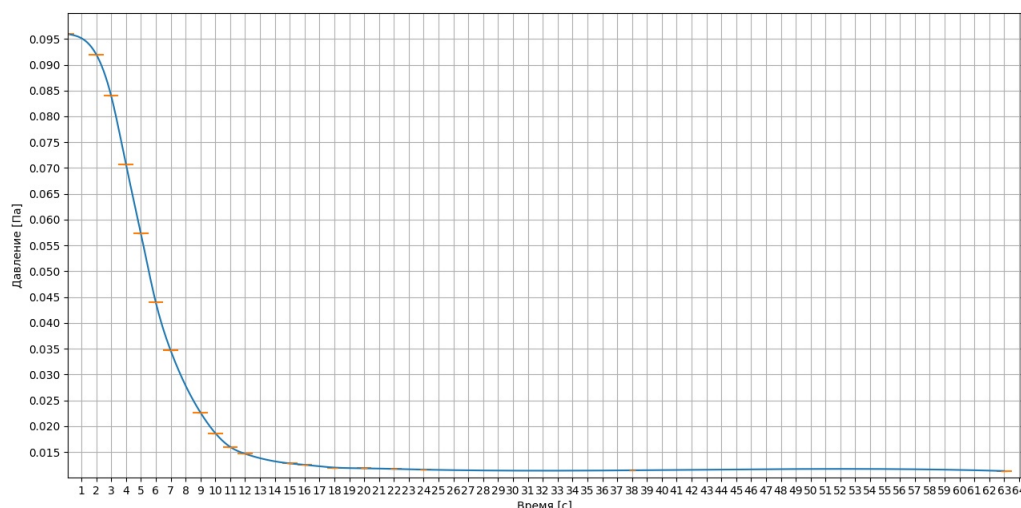
где P_0 – атмосферное давление; V_0 – объем капилляра и кранов 5 и 6; P_v – установившееся давление; V_f и V_v – соответственно объемы форвакуумной и высоковакуумной частей.

2. Для измерения скорости откачки диффузионного насоса измерим улучшение вакуума во времени. Построим график зависимости $-\ln \frac{P-P_{pr}}{P_0}$ от t . Из формулы (4) следует, что наклон, построенной кривой, есть W/V
3. Откроем кран 6 и создадим искусственную течь через капилляр. Рассчитаем производительность насоса по различию P_{pr} и P_u , где P_u – установившееся давление в высоковакуумной части с искусственной течью. В условиях высокого вакуума справедлива формула (5), где положим $P_1 := P_u$, P_2 – давление в форвакуумной части.

4 Ход работы

4.1 Расчет скорости откачки

Построим график зависимости давления от времени при открытом кране 3, что соответствует улучшению вакуума:



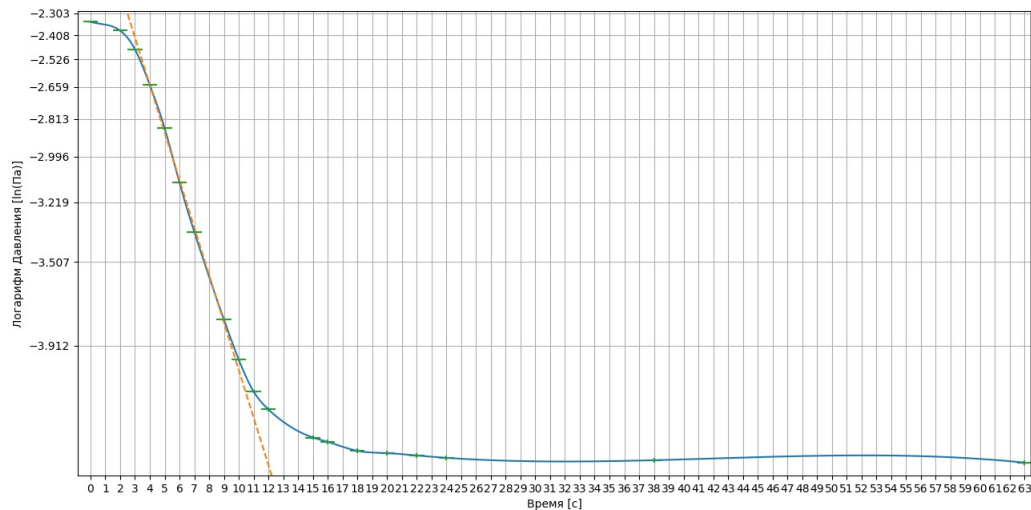
Как видим, зависимость на участке 2-10 секунд напоминает экспоненциальную, что описывается формулой:

$$P = P_0 \exp -\frac{W}{V} \cdot t + P_{limit} \quad (8)$$

, где P_0 - некоторое начальное значение давления, W - скорость откачки, P_{limit} - предельное значение давления

После участка экспоненциальной зависимости наблюдаем прямую, практически параллельную оси x . Значит в установке было достигнуто предельное давление, и коэффициент наклона $\alpha \rightarrow 0$.

Убедимся в экспоненциальной зависимости на участке 2-10, и рассчитаем скорость откачки W . Для этого построим график в логарифмическом масштабе по оси y и методом наименьших квадратов рассчитаем коэффициент наклона прямой:



$$\alpha = -0.230 \pm 0.005 \quad (9)$$

Выразим скорость откачки из формулы (8):

$$d \ln P = -\frac{W}{V} \cdot dt \quad (10)$$

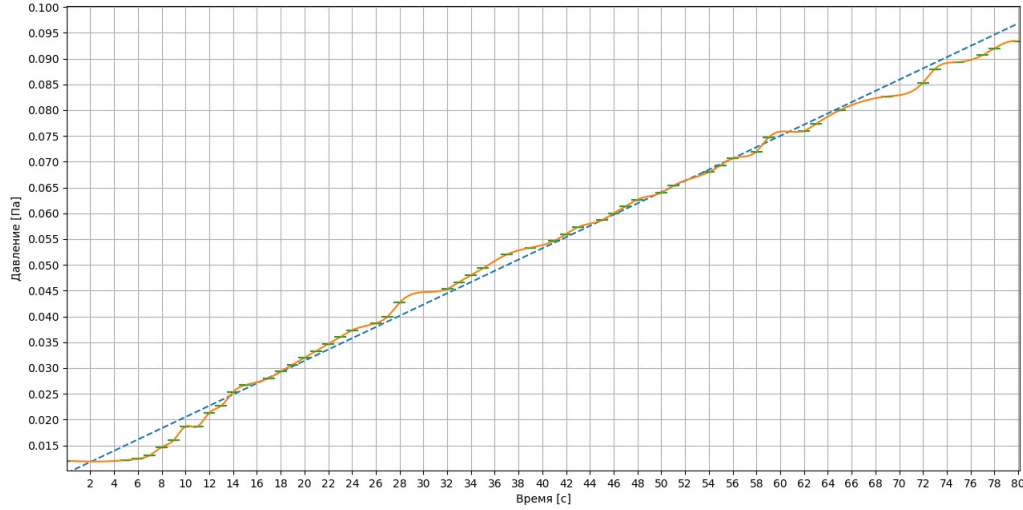
$$W = -\alpha V \quad (11)$$

Получим $W = 0.80 \pm 0.04$ л/с

4.2 Рассчитаем поток газа, поступающего из насоса в откачивающую систему

Теперь построим график зависимости давления от времени при ухудшении вакуума, методом наименьших квадратов оценим коэффициенты наклона:

$$\alpha = 1.09 \cdot 10^{-3} \pm 1 \cdot 10^{-5} \quad (12)$$



Воспользуемся основным уравнением, описывающим процесс откачки. Учтем, что во время выполнения данной части эксперимента течей извне создано не было: $Q_{out} = 0$. Получим:

$$Q_p = P_{limit}W - V_{hv}\alpha \quad (13)$$

Методом частных производных оценим погрешности, в результате получим значение: $Q_p = 0.0073 \pm 0.0005 \text{ Л*Па/с}$

4.3 Измерение скорости откачки в условиях течи

Воспользуемся формулами:

$$P_{limit}W = Q_1 \quad (14)$$

$$P_{set}W = Q_1 + \frac{d(PV)_k}{dt} \quad (15)$$

Выразим Q_1 - сумму натеканий без учета натекания через искусственную течь. Подставив выраженное значение в формулу (6) и рассчитав количество газа, проходящего через капилляр сможем рассчитать скорость откачки. В результате получим: $W_1 = 0.0560 \pm 0.0012 \text{ л/с}$.

5 Вывод

С точностью 5% удалось рассчитать скорость откачки. Скорость откачки во втором эксперименте меньше скорости откачки в первом примерно на 25%. Очевидно, так как искусственная течь 'мешает' откачке. Об аккуратности проведения эксперимента и правильной работе оборудования можно судить по малому коэффициенту наклона графика зависимости $P(t)$ в эксперименте по ухудшению вакуума и малая масса газа потсупающая в установку через насос. Предельное давление, полученное в эксперименте, составило порядка $8.3 \cdot 10^{-5} \text{ мм.рт.с}$, что соответствует длине свободного пробега порядка нескольких дециметров. Такой вакуум классифицируется как «высокий», так как равновероятно столкновение со стенками и с другими молекулами: $\lambda/d \approx 1$.