

Московский физико-технический институт
Факультет молекулярной и химической физики

Лабораторная работа №2.3.1
«Получение и измерение вакуума»

Выполнил:
студент 1 курса
642 группы ФМХФ
Кожарин Алексей
Сергеевич

Москва 2017

Аннотация:

В этом отчёте изложены результаты выполнения лабораторной работы «Получение и измерение вакуума». С помощью установки, состоящей из форвакуумной и высоковакуумной частей мы получаем высокий вакуум ($p \sim 10^{-4}$ торр), а затем измеряем параметры установки: объёмы всех ее частей и скорость откачки в стационарном режиме, при ухудшении и улучшении вакуума. Для этого мы создаем искусственную течь.

Цель работы:

- 1) измерение объёмов форвакуумной и высоковакуумной частей установки;
- 2) определение скорости откачки системы в стационарном режиме, а также при ухудшении и улучшении вакуума.

1. Теоретическое введение

По степени разрежения 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 (а течение газа становится сугубо молекулярным); сверхвысокий вакуум характерен крайней важностью процессов адсорбции и десорбции частиц на поверхности вакуумной камеры.

В данной работе изучаются традиционные методы откачки механическим форвакуумным насосом до давления 10^{-2} торр и диффузионным масляным насосом до давления 10^{-5} торр, а также методы измерения вакуума в этом диапазоне.

2. Экспериментальная установка

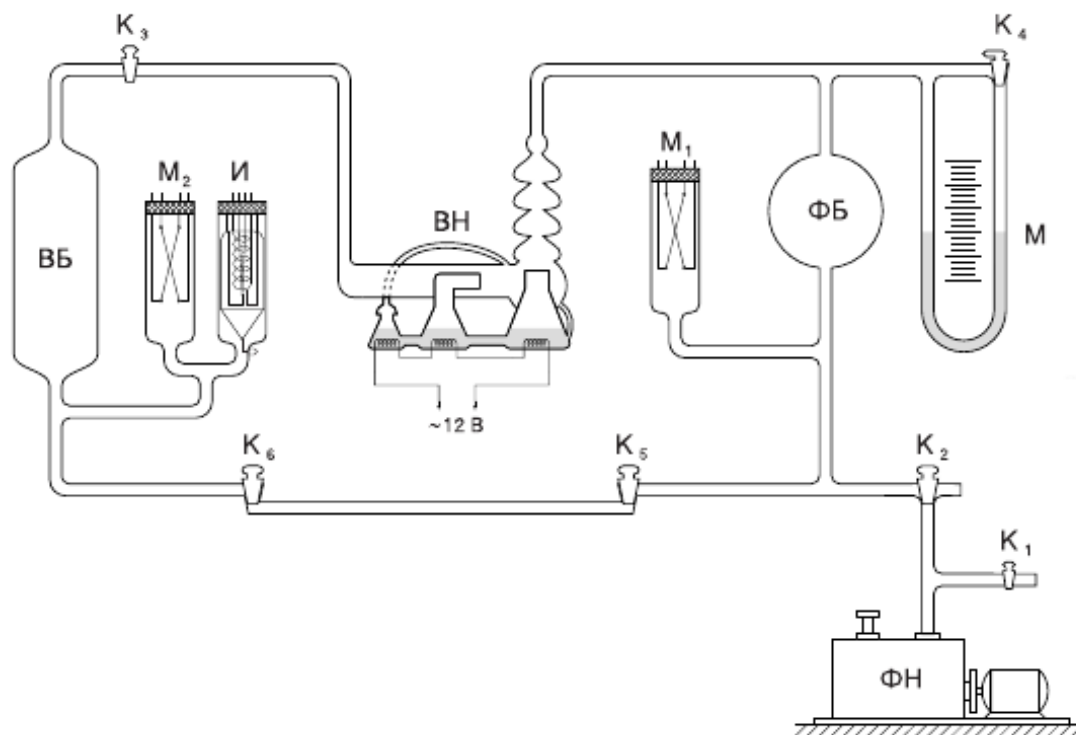


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Установка изготовлена из стекла и состоит из форвакуумного баллона (ФБ), высоковакуумного диффузионного насоса (ВН), высоковакуумного баллона (ВБ), масляного (М) и ионизационного (И) манометров, термопарных манометров (М1 и М2), форвакуумного насоса (ФН) и соединительных кранов К1, К2, ..., К6 (см. рис. 1).

Краны. Все краны вакуумной установки — стеклянные. Стенки кранов тонкие, пробки кранов — полые и составляют одно целое с рукоятками. Для герметизации используется вакуумная смазка.

Кран К1 используется для заполнения форвакуумного насоса и вакуумной установки атмосферным воздухом. Трехходовой кран К2 служит для соединения форвакуумного насоса с установкой или атмосферой. Кран К3 отделяет высоковакуумную часть установки от форвакуумной. Кран К4 соединяет между собой колена масляного манометра. Краны К5 и К6 стоят по концам капилляра и соединяют его с форвакуумной и высоковакуумной частями установки.

Форвакуумный насос. Устройство, обеспечивающее механическую откачку воздуха до 10^{-2} торр, называется форвакуумным насосом. Его использование необходимо для того, чтобы подготовить подходящие условия для работы диффузионного насоса. Схематически принцип работы форвакуумного насоса изображен на рис. 2.

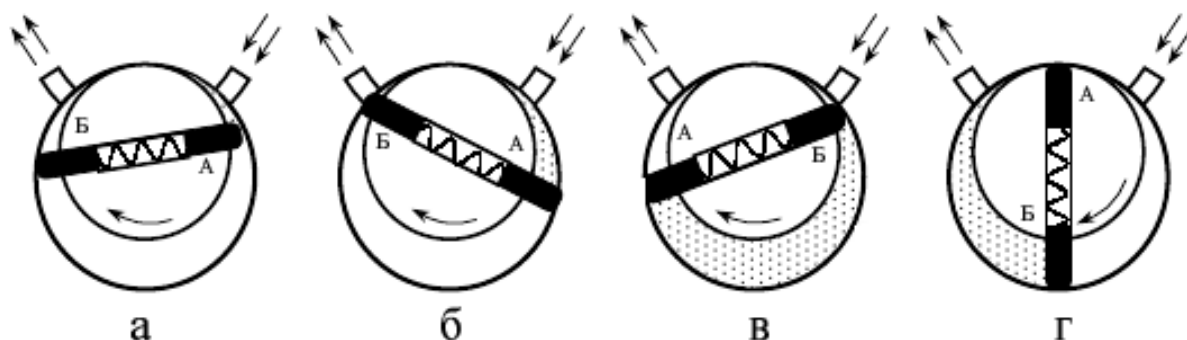


Рис. 2. Схема форвакуумного насоса. В положениях «а» и «б» пластина «А» засасывает разреженный воздух из откачиваемого объёма, а пластина «Б» вытесняет ранее захваченный воздух в атмосферу. В положениях «в» и «г» пластины поменялись ролями

Диффузионный насос. Откачивающее действие диффузионного насоса основано на диффузии молекул разреженного воздуха в струю паров масла. Попавшие в струю молекулы газа увлекаются ею и уже не возвращаются назад. Это и создает откачивающее действие. Схематически это изображено на рис. 3. Диффузионный насос, используемый в нашей установке, имеет две ступени и соответственно два сопла. Одно сопло вертикальное (первая ступень), второе сопло горизонтальное (вторая ступень).

3. Процесс откачки

Рассмотрим обычную схему откачки. Обозначим через Q_d количество газа, десорбирующегося с поверхности откачиваемого объема в единицу времени, через Q_n — 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

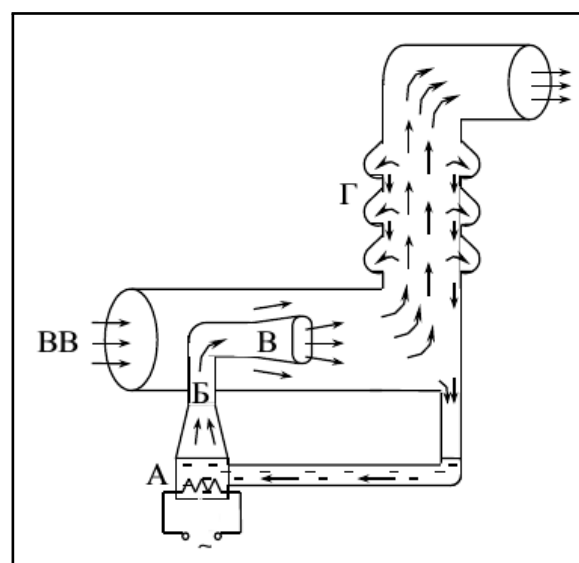


Рис. 3. Схема работы диффузионного насоса

источником газа; пусть Q_n — поток газа, поступающего из насоса назад в откачиваемую систему. Будем измерять количество газа Q_d , Q_n и Q_i в единицах PV (легко видеть, что это произведение с точностью до множителя RT/μ равно массе газа). Основное уравнение, описывающее процесс откачки, имеет вид:

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

При достижении предельного вакуума:

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

так что

$$P_{пр}W = Q_d + Q_n + Q_i \quad (2)$$

Отсюда скорость откачки через предельный вакуум:

$$W = \frac{\sum Q_i}{P_{пр}}$$

Считая Q_i , Q_n , Q_d постоянным, уравнение (1) можно проинтегрировать и, используя (2), получить

$$P - P_{пр} = (P_0 - P_{пр}) \exp\left(-\frac{W}{V}t\right) \quad (3)$$

где P_0 — начальное давление. Оно велико по сравнению с $P_{пр}$, поэтому имеем:

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{W}{V}t\right) \quad (4)$$

Постоянная времени откачки $\tau = \frac{V}{W}$ является мерой эффективности откачной системы.

Для количества газа, протекающего через трубу в условиях высокого вакуума, справедлива формула:

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

Теория и рисунки взяты из [1]

4. Обработка данных

По перепаду давлений в U-образном манометре находим объём форвакуумной и высоковакуумной части по формуле $P_0V_0 = P_1V_1$,

где $P_1 = \rho_M g \Delta h$, $\rho_M = 0.886 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$, $g = 9.8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$

$$\Delta h_{фв} = 14.5 \text{ см} \rightarrow \boxed{V_{фв} = 3040 \text{ см}^3}$$

$$\Delta h_{вв+фв} = 10.75 \text{ см} \rightarrow V_{вв+фв} = 4100 \text{ см}^3 \Rightarrow \boxed{V_{вв} = 1060 \text{ см}^3}$$

Минимальное давление, которое можно получить только лишь с использованием форвакуумного насоса, равно $p_{\min} = 1.6 \cdot 10^{-2}$ торр. Для него длина свободного пробега

$$\lambda_1 = \frac{1}{n\sigma} = \frac{kT}{P\pi d^2} = 4.7 \text{ см}$$

Для высоковакуумной установки можно получить давление $p_{\min} = 2.2 \cdot 10^{-4}$ торр. Для него $\lambda_2 = 1.2 \text{ м}$

Для эксперимента с улучшением вакуума, как следует из формулы (4), строим график $\ln(p/p_0)(t)$:

| $t, \text{ c}$ | $\mu A, \text{ mA}$ | $p \cdot 10^{-4}, \text{ торр}$ | $\ln(p/p_0)$ |
|----------------|---------------------|---------------------------------|--------------|
| 0 | 91 | 9,1 | 0 |
| 2 | 78 | 7,8 | -0,1541 |
| 4 | 67 | 6,7 | -0,3061 |
| 6 | 59 | 5,9 | -0,4333 |
| 8 | 52 | 5,2 | -0,5596 |
| 10 | 48 | 4,8 | -0,6396 |
| 12 | 44 | 4,4 | -0,7266 |
| 14 | 40 | 4,0 | -0,8219 |
| 16 | 38 | 3,8 | -0,8732 |
| 18 | 35 | 3,5 | -0,9555 |
| 20 | 33 | 3,3 | -1,0143 |
| 22 | 32 | 3,2 | -1,0451 |
| 24 | 30 | 3,0 | -1,1096 |
| 26 | 29 | 2,9 | -1,1435 |
| 28 | 28,5 | 2,9 | -1,1609 |
| 30 | 28 | 2,8 | -1,1786 |
| 32 | 27 | 2,7 | -1,2150 |
| 34 | 26 | 2,6 | -1,2527 |
| 36 | 26 | 2,6 | -1,2527 |
| 38 | 25,5 | 2,6 | -1,2721 |
| 40 | 25 | 2,5 | -1,2919 |
| 42 | 25 | 2,5 | -1,2919 |

Таблица 1. Значения, полученные при проведении эксперимента

Видно, что для больших промежутков времени теоретическая зависимость нарушается. Вероятнее всего, это связано с неприменимостью формулы (4) для почти стационарного процесса. Поэтому имеет смысл проводить аппроксимацию по первым точкам. По наклону определяем скорость откачки системы:

$$W = -V \cdot k = 67.8 \frac{\text{см}^3}{\text{с}}$$

Зная p_{\min} и W , можно определить по (2) $Q_{\text{д}} + Q_{\text{н}} + Q_{\text{и}}$:

$$Q_{\text{д}} + Q_{\text{н}} + Q_{\text{и}} = 1.49 \cdot 10^{-2} \frac{\text{торр} \cdot \text{см}^3}{\text{с}}$$

По эксперименту с ухудшением вакуума можно судить о $Q_{\text{д}} + Q_{\text{и}}$:

| $t, \text{ c}$ | $\mu A, \text{ mA}$ | $p, \text{ торр} \cdot 10^{-4}$ |
|----------------|---------------------|---------------------------------|
| 0 | 22 | 2,2 |
| 2 | 26 | 2,6 |
| 4 | 29 | 2,9 |
| 6 | 32 | 3,2 |
| 8 | 34,5 | 3,45 |
| 10 | 38 | 3,8 |
| 12 | 40,5 | 4,05 |
| 14 | 43 | 4,3 |
| 16 | 46 | 4,6 |
| 18 | 49 | 4,9 |
| 20 | 51,5 | 5,15 |
| 22 | 54 | 5,4 |
| 24 | 57 | 5,7 |
| 26 | 59,5 | 5,95 |
| 28 | 62,5 | 6,25 |
| 30 | 65 | 6,5 |
| 32 | 68 | 6,8 |
| 34 | 71 | 7,1 |
| 36 | 73 | 7,3 |
| 38 | 76,5 | 7,65 |
| 40 | 78,6 | 7,86 |
| 42 | 82 | 8,2 |
| 44 | 84 | 8,4 |
| 46 | 86 | 8,6 |
| 48 | 89 | 8,9 |

Таблица 2. Табличные данные и значения, полученные при проведении эксперимента

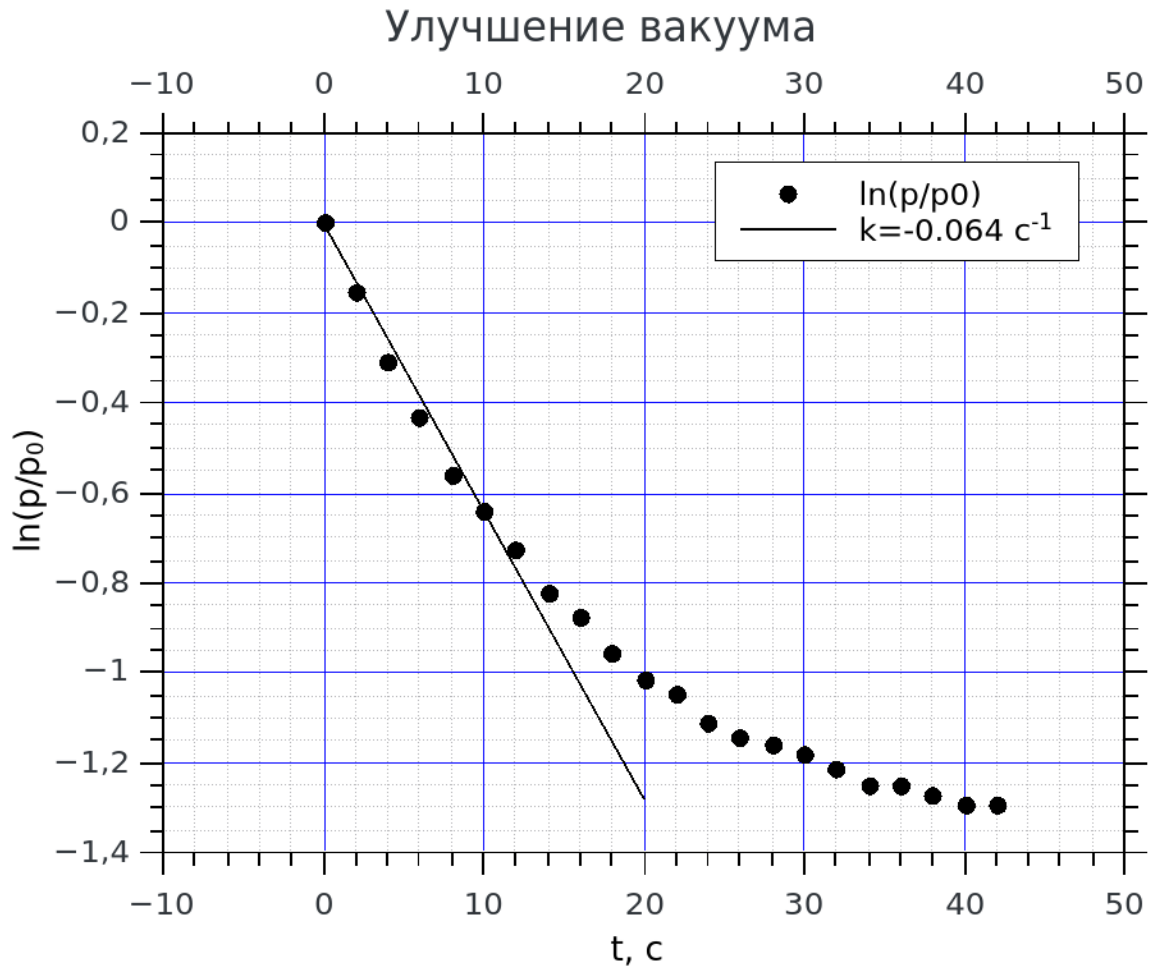


Рис. 4. Эксперимент с улучшением вакуума.

Пользуясь формулой $V_{\text{вв}} \frac{dP}{dt} = Q_{\text{д}} + Q_{\text{и}}$, находим $Q_{\text{д}} + Q_{\text{и}} = 1.46 \cdot 10^{-2} \frac{\text{торр} \cdot \text{см}^3}{\text{с}}$

Отсюда сразу $Q_{\text{и}} = 3 \cdot 10^{-4} \frac{\text{торр} \cdot \text{см}^3}{\text{с}}$

По полученным данным можно посчитать пропускную способность трубы:

$$C_{\text{тр}} = \left(\frac{dV}{dt} \right)_{\text{тр}} = \frac{4r^3}{3L} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} = 2.18 \cdot 10^{-1} \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \quad (6)$$

Видно, что $W \ll C_{\text{тр}}$ — газ сильно разрежен.

Для эксперимента с искусственной течью через капилляр воспользуемся формулой (5):

$$\frac{d(PV)}{dt} = 1.29 \cdot 10^{-2} \frac{\text{торр} \cdot \text{см}^3}{\text{с}}$$

Попробуем пойти несколько в обратном направлении. Зная $P_{\text{пр}}$, $P_{\text{уст}}$ и $\frac{d(PV)}{dt}$, можно составить систему:

$$\begin{cases} P_{\text{пр}} W = Q_1 \\ P_{\text{уст}} W = Q_1 + \frac{d(PV)_{\text{капп}}}{dt} \end{cases}$$

Разрешая её относительно W и $Q_1 = Q_{\text{д}} + Q_{\text{и}} + Q_{\text{и}}$, получаем:

$$\begin{aligned} W &= 61.4 \frac{\text{см}^3}{\text{с}} \\ Q_1 &= 1.35 \cdot 10^{-2} \frac{\text{торр} \cdot \text{см}^3}{\text{с}} \\ (\text{Здесь мы учли, что, } p_u &= 4.3 \cdot 10^{-4} \text{ торр}) \end{aligned}$$



Рис. 5. Эксперимент с ухудшением вакуума.

5. Заключение

В данной работе рассматривалось получение вакуума в две стадии.

После измерения параметров установки были получены следующие значения:

$$\begin{aligned}
 p_{\text{пред}} &= 2.2 \cdot 10^{-4} \text{ торр} \\
 W &= 67.8 \frac{\text{см}^3}{\text{с}} \\
 Q &= 1.49 \cdot 10^{-2} \frac{\text{торр} \cdot \text{см}^3}{\text{с}}
 \end{aligned}$$

Список литературы

- [1] Гладун А.Д. Лабораторный практикум по общей физике: Учебное пособие. В трех томах. Т. 1. Термодинамика и молекулярная физика. Москва: МФТИ, 2012.