

Московский Физико-технический Институт
(Национальный исследовательский университет)

Отчет о выполнении работы 2.3.1

Получение и измерение вакуума

Выполнили студентки 1 курса
ФБМФ, группа Б06-103
Попеску Полина
Фитэль Алёна

Долгопрудный, 2022 г.

1 Введение

Цель работы: 1. Измерение объёмов форвакуумной и высоковакуумной частей установки; 2. Определение скорости откачки системы в стационарном режиме, а также по ухудшению и улучшению вакуума

В работе используются: вакуумная установка, масляный, термопарный и ионизационный вакуумметры, форвакуумный и диффузионный насосы

2 Теоретический материал

2.1 Основные характеристики вакуума

Одна из основных характеристик систем, работающих при вакууме – число Кнудсена:

$$Kn = \frac{\lambda}{d}, \quad (1)$$

λ – длина свободного пробега молекул газа, d – характерный размер системы.

В зависимости от значений числа Кнудсена определяют:

- 1) низкий вакуум – $Kn \ll 1$
- 2) средний вакуум – $Kn \sim 1$
- 3) высокий вакуум – $Kn \gg 1$

Основные формулы, отображающие теоретические зависимости между исследуемыми величинами:

Скорость откачки:

$$S = \frac{dV}{dt}; \quad (2)$$

Падение давления:

$$\Delta P = P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}; \quad (3)$$

Пропускная способность:

$$U = \frac{Q}{\Delta P}; \quad (4)$$

Основное уравнение вакуумной механики:

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{S_{\text{техн}}} + \frac{1}{U}; \quad (5)$$

$$Q_{\text{н}} = V \frac{P_{\text{к}} - P_{\text{н}}}{\Delta t} \quad (6)$$

Проводимость отверстия:

$$C_{\text{отв}} = \frac{1}{4} \pi R^2 \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \sim R^2 \sqrt{T/m} \quad (7)$$

Проводимость длинного трубопровода

$$C_{\text{тр}} = \frac{4}{3} \frac{R^3}{L} \sqrt{\frac{2\pi kT}{m}} \sim \frac{R^3}{L} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (8)$$

Уравнение откачки газа

$$P(t) = P_1 \exp\left(-\frac{S_0}{V_0} t\right) \quad (9)$$

2.2 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.

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_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

$$VdP = (PW - Q_d - Q_n - Q_i)dt \quad (10)$$

При достижении предельного вакуума

$$\frac{dP}{dt} = 0, \quad (11)$$

поэтому

$$P_{\text{пр}}W = Q_d + Q_n + Q_i. \quad (12)$$

Формула, выражающая скорость откачки через предельный вакуум:

$$W = \sum Q_i / P_{\text{пр}}. \quad (13)$$

Считая постоянными потоки газа и скорость откачки, интегрируем первое уравнение и получаем

$$P - P_{\text{пр}} = (P_0 - P_{\text{пр}}) \cdot \exp\left(-\frac{W}{V}t\right) \quad (14)$$

При начальном давлении P_0 значительно большем, чем $P_{\text{пр}}$, имеем:

$$P = P_0 \cdot \exp\left(-\frac{W}{V}t\right) + P_{\text{пр}}. \quad (15)$$

Скорость откачки системы зависит от характеристик насоса, перепада давлений, а также от пропускной способности трубопроводов. Практическое правило заключается в том, что диаметры соединительных трубок не очень существенны в форвакуумной части установки и крайне важны в высоковакуумной. Диаметр трубок в этой части должен быть не меньше, чем диаметр самого насоса.

2.3 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 столкновения молекул между собой начинают играть меньшую роль, чем соударения со стенками.

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

$$\frac{d(PV)}{dt} = \frac{4}{3}r^3 \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \frac{P_2 - P_1}{L} \quad (16)$$

Применим эту формулу к случаю, когда труба соединяет установку с насосом.

Пренебрежём давлением P_1 у конца, обращённого к насосу. Будем измерять количество газа, покидающего установку при давлении $P = P_2$. Пропускная способность трубы $C = (\frac{dV}{dt}) = \frac{4}{3} \frac{r^3}{L} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}}$. Пропускная способность зависит от радиуса трубы в третьей степени и обратно пропорциональна ее длине.

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

$$\nu = \frac{1}{4} S n \bar{v}, \quad (17)$$

где ν — число молекул, вылетающих из отверстия в вакуум в единицу времени, S — площадь отверстия, n — концентрация молекул перед отверстием, \bar{v} — средняя скорость молекул газа.

С другой стороны, $\nu = dN/dt$, $N = PV/kT$, $n = P/kT$, и аналогично формуле для количества газа, покидающего установку при давлении P , получается пропускная способность отверстия

$$C = \left(\frac{dV}{dt} \right) = S \frac{\bar{v}}{4}. \quad (18)$$

Для воздуха при комнатной температуре $\bar{v}/4 = 110 \text{ м/с} = 11 \text{ л/с} \cdot \text{см}^2$

3 Экспериментальная установка

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. 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. Установка изготовле-

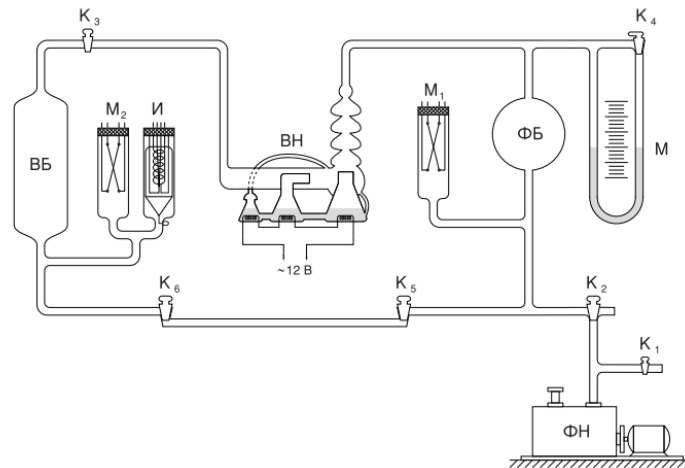


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

на 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 (рис. 1). Кроме того, в состав установки входят: вариатор (автотрансформатор с регулируемым выходным напряжением), или реостат и амперметр для регулирования тока нагревателя диффузионного насоса.

4 Обработка результатов измерений

1. Запустим воздух в систему и подождём, пока он заполнит установку. Запустим форвакуумный насос, чтобы он откачал воздух из установки. Давление в установке уменьшается, продолжим откачку до момента, когда $P = (2.0 \pm 0.1) \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. Отсоединим установку от форвакуумного насоса, а затем объём, заключённый в кранах и капиллярах форвакуумной части, откроем на всю форвакуумную часть. Тогда давление изменится. Запишем высоту масла в обоих коленах масляного манометра:

$$h_1 = (39.6 \pm 0.1) \text{ см масл. ст.}, h_2 = (13.1 \pm 0.1) \text{ см масл. ст.}, \Delta h_{\text{фв}} = h_1 - h_2 = (26.5 \pm 0.1) \text{ см масл. ст.}$$

Плотность масла равна $\rho = 0.885 \text{ г/см}^3$

2. Зная объём "запертого" воздуха $V_{\text{к5+к6+кап}} = 50 \text{ см}^3$ и используя соотношение $P_1/P_2 = V_2/V_1$, вычислим объём форвакуумной части установки. При этом давление $P_1 = P_{\text{атм}} = (98.8 \pm 0.1) \text{ кПа}$ $P_2 = \rho_{\text{масл}} g \Delta h_{\text{фв}}$. Получаем $V_{\text{фв}} = (2.17 \pm 0.01) \text{ л}$.
3. Откроем краны так, чтобы воздух, занимавший до сих пор только форвакуумную часть установки, заполнил и высоковакуумную часть. Вновь измерим и запишем показания масляного манометра: $h_3 = (35.2 \pm 0.1) \text{ см масл. ст.}$, $h_4 = (18.3 \pm 0.1) \text{ см масл. ст.}$, $\Delta h_{\text{фв}} = h_3 - h_4 = (16.9 \pm 0.1) \text{ см масл. ст.}$

Рассчитаем объём высоковакуумной части: $V_{\text{вв}} = (1.23 \pm 0.02) \text{ л}$. Полный объём установки:

$$V_{\text{уст}} = (3.40 \pm 0.02) \text{ л}$$

4. Найдем скорость откачки W системы по ухудшению и улучшению вакуума. Для этого открывая и закрывая кран K_3 будем то подключать насос к объёму, то отключать его, при этом на видео зафиксируем показания манометра от времени и построим графики (Рис. 2, Рис. 3).

5. Рассмотрим сначала улучшение вакуума.

Воспользуемся формулой

$$P - P_{\text{пр}} = (P_0 - P_{\text{пр}}) \cdot \exp(-\frac{W}{V}t).$$

Получим:

$$\ln(P - P_{\text{пр}}) = -\frac{W}{V}t + \ln(P_0 - P_{\text{пр}}).$$

В координатах $\ln(P - P_{\text{пр}})(t)$ построим график зависимости давления в высоковакуумной части при улучшении вакуума от времени. Коэффициент угла наклона $k = -\frac{W}{V}$.

Предельное значение достигнутого давления в системе со стороны высоковакуумной части $P_{\text{пр}} = (5.6 \pm 0.1) \cdot 10^{-5} \text{ мм рт. ст.}$ Зная объём высоковакуумного баллона $V = 1,23 \pm 0,02$ и усреднив значение коэффициента наклона построенных прямых в координатах $\ln(P - P_{\text{пр}})(t)$ ($k = 0,219 \pm 0,003 \text{ л}^2/\text{с}$), найдем скорость откачки системы

$$W_1 = -kV = (2,64 \pm 0,01) \cdot 10^{-2} \text{ л/с}$$

Рис. 2: Зависимость давления от времени, улучшение вакуума

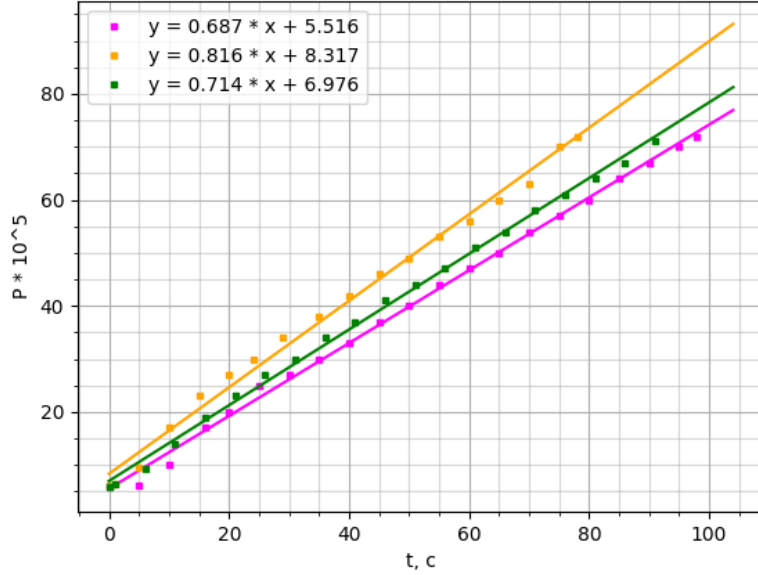


Рис. 3: Зависимость давления от времени, ухудшение вакуума

6. Рассмотрим ухудшение вакуума. Оценим величину потока газа Q_H , поступающего из насоса назад в откачиваемую систему. Уравнения для этого имеет следующий вид: $V_v dP = (Q_D + Q_H)dt$ (пренебрегаем при этом Q_I - потоком газа, образующимся за счет течи в системе).

Построим графики зависимости $P(t)$ и определим для них коэффициенты угла наклона прямой. Усредненное значение угла наклона $k = (0,74 \pm 0,01) \cdot 10^{-5}$ торр/с. Тогда получим $(Q_D + Q_H) = kV_v = (0,91 \pm 0,02) \cdot 10^{-5}$ торр \cdot л/с

Вследствие того, что Q_D обычно порядка 10^{-8} , то считаем $Q_H + Q_D \approx Q_H$. Таким образом,

$$Q_H = (9,1 \pm 0,2) \cdot 10^{-6} \text{ торр} \cdot \text{л/с}$$

7. Рассчитаем производительность насоса ещё одним способом: создав искусственную течь. Открываем кран K_6 при включённом насосе и измеряем давление, установившееся при течи. Оно равно

$$P_{уст} = (1,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-4} \text{ торр.}$$

Запишем (10) для данного случая:

$$P_{пр}W = Q_1, \quad P_{уст}W = Q_1 + \frac{d(PV)_{\text{капилляр}}}{dt}$$

С учётом (7) получаем:

$$(P_{уст} - P_{пр})W = \frac{4}{3}(d/2)^3 \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \frac{P_{фв}}{L},$$

где d и L — диаметр и длина капилляра, равные

$$d = 0,8 \pm 0,1 \text{ мм}, \quad L = 10,8 \pm 0,1 \text{ см}$$

Получаем:

$$W_2 = (1,5 \pm 0,8) \cdot 10^{-2} \text{ л/с}$$

Сравним полученное нами значение скорости откачки с значением из пункта 5:

$$W_1 = (2,6 \pm 0,1) \cdot 10^{-2} \text{ л/с}$$

$$W_2 = (1,5 \pm 0,8) \cdot 10^{-2} \text{ л/с}$$

5 Выводы

В ходе данной работы было проведено ознакомление с вакуумной техникой.

1. Были измерены объемы форсвакуумной части, высоковакуумной и объем всей установки: $V_{\text{фв}} = (2.17 \pm 0.01) \text{ л}$, $V_{\text{вв}} = (1.23 \pm 0.02) \text{ л}$, $V_{\text{уст}} = (3.40 \pm 0.02) \text{ л}$.
2. Двумя способами была определена скорость откачки диффузионного насоса: по улучшению вакуума и по разности давлений при впускании в высоковакуумную часть искусственной течи и предельного давления в высоковакуумной части установки. Полученные результаты:

$$W_1 = (2,6 \pm 0,1) \cdot 10^{-2} \text{ л/с}$$

$$W_2 = (1,5 \pm 0,8) \cdot 10^{-2} \text{ л/с}$$

Полученные нами значения плохо совпадают в пределах погрешностей. Основная предполагаемая причина несовпадения результатов заключается в том, что в формуле для определения скорости откачки вторым способом фигурирует температура. Для расчета была взята комнатная температура, но температура воздуха в установке по факту выше: его нагревают элементы, нагревающие масло в диффузионном насосе. Эта температура достаточно велика, поэтому конечное значение скорости откачки, определяемое вторым способом, должно быть несколько выше полученного нами значения.

3. Определён поток воздуха, вытекающий через насос назад в высоковакуумную часть установки при откачке:

$$Q_{\text{н}} = (9,1 \pm 0,2) \cdot 10^{-6} \text{ торр} \cdot \text{л/с}$$

Эта величина оказалась сравнительно мала (на 4 порядка меньше) по сравнению с определённой экспериментально двумя способами скоростью откачки насоса.