

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа радиотехники и компьютерных технологий



## Лабораторная работа 2.3.1

### Получение и измерение вакуума

Автор:  
Григорьев Даниил  
Б01-407

# 1 Аннотация

**Цель работы:** 1) измерение объемов 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 с манометрами: масляным, термомпарным и ионизационным.

## 2 Теоретическая часть

### 2.1 Процесс откачки

Пусть  $W$  — объем газа, удаляемого из сосуда при данном давлении за единицу времени,  $Q_i$  для различных значений  $i$  обозначим различные притоки газа в сосуд (в единицах  $PV$ ), такие как течи извне  $Q_{\text{и}}$ , десорбция с поверхностей внутри сосуда  $Q_{\text{д}}$ , обратный ток через насос  $Q_{\text{н}}$ . Тогда имеем:

$$-VdP = \left( PW - \sum Q_i \right) dt \quad (1)$$

При достижении предельного вакуума устанавливается  $P_{\text{пр}}$ , и  $dP = 0$ . В таком случае:

$$W = \frac{\sum Q_i}{P_{\text{пр}}} \quad (2)$$

Поскольку обычно  $Q_{\text{и}}$  постоянно, а  $Q_{\text{н}}$  и  $Q_{\text{д}}$  слабо зависят от времени, также считая постоянной  $W$ , можем проинтегрировать (1) и получить:

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

Полная скорость откачки  $W$ , собственная скорость откачки насоса  $W_{\text{н}}$  и проводимости элементов системы  $C_1, C_2, \dots$  соотносятся согласно формуле (4), и это учтено в конструкции установки.

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_{\text{н}}} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots \quad (4)$$

### 2.2 Течение газа через трубу

Характер течения газа существенно зависит от соотношения между размерами системы и длиной свободного пробега молекул. При атмосферном и форвакуумном давлениях длина свободного пробега меньше диаметра трубок, и течение газа определяется его вязкостью, т.е. взаимодействием молекул. При переходе к высокому вакууму столкновения молекул между собой начинают играть меньшую роль, чем соударения со стенками.

Для количества газа, протекающего через трубу длины  $l$  и радиуса  $r$  в условиях высокого вакуума, справедлива формула:

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

Если труба соединяет установку с насосом, то давлением  $P_1$  у его конца можно пренебречь. Давление в сосуде  $P = P_2$ . Тогда пропускная способность трубы:

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

### 3 Экспериментальная установка

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 ( $M_1$  и  $M_2$ ), форвакуумного насоса (ФН) и соединительных кранов ( $K_1, K_2, \dots K_6$ ) (Рис. 1). Кроме того, в состав установки входят: реостат и амперметр для регулирования тока нагревателя диффузионного насоса.

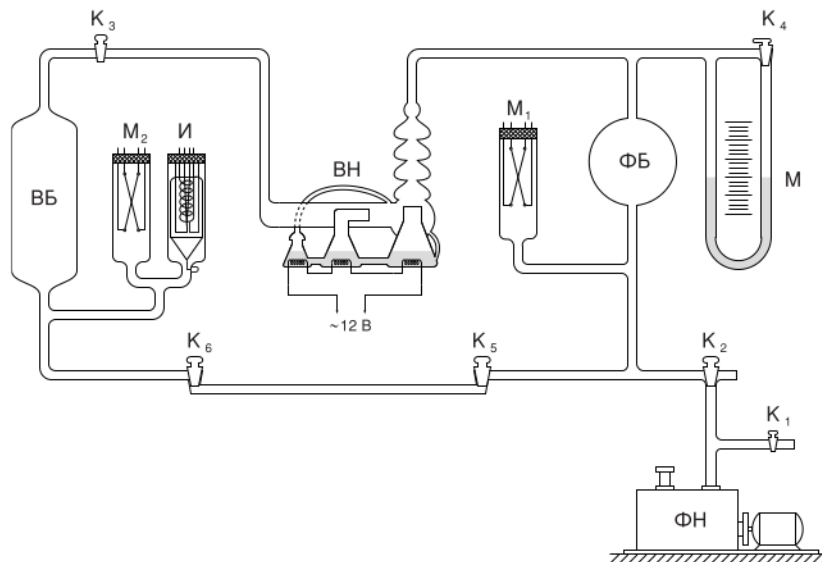


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

### 4 Ход работы

#### 4.1 Определение объема форвакуумной и высоковакуумной частей установки

1. Атмосферное давление равно  $P_A = (752 \pm 1)$  торр.
2. Впустим в установку атмосферный воздух через краны  $K_1$  и  $K_2$ .
3. Закроем краны  $K_5$  и  $K_6$ , запрем  $V_{\text{зап}} = 50 \text{ см}^3$  воздуха.
4. Закроем краны  $K_1$  и  $K_2$ , включим форвакуумный насос. Подключим установку к форвакуумному насосу краном  $K_2$  и откачаем ее до давления  $10^{-2}$  торр.
5. Повернув рукоятку крана  $K_2$ , отсоединим установку от форвакуумного насоса. Откроем кран  $K_1$ .
6. Перекрыв  $K_3$ , отделим ВБ от ФБ.
7. Закроем  $K_4$ .
8. Откроем  $K_5$ , измерим уровень масла слева и справа, которые дадут нам давление  $P_1$ . Из закона Бойля-Мариотта  $V_{\text{фв}} = V_{\text{зап}} P_A / P_1$ .
9. Аналогичным методом измерим объем  $V_{\text{вв}}$ , открыв кран  $K_3$ .

10. Результаты первого измерения в таблице 1. Погрешность измерения уровня примем  $\Delta h = 0,1$  см.

$h_1$ , см	$h_2$ , см	$P_1$ , торр	$h_3$ , см	$h_4$ , см	$P_2$ , торр
35,0	15,0	13,0	31,6	18,8	8,3

**Таблица 1.** Таблица первых показаний масляного манометра.

Сотрудник лаборатории сразу понял, что измерения неверны, поэтому измерим второй раз, более внимательно. Результаты в таблице 2.

$h_1$ , см	$h_2$ , см	$P_1$ , торр	$h_3$ , см	$h_4$ , см	$P_2$ , торр
38,3	11,3	18,6	33,7	16,3	11,8

**Таблица 2.** Таблица вторых показаний масляного манометра.

Расхождения в измерениях скорее всего связаны с тем, что в первом случае при снятии измерений мы поторопились и не дождались равновесного положения жидкости в масляном манометре.

11. Получим  $V_{\text{фв}} = (2139 \pm 40) \text{ см}^3$ ,  $V_{\text{вв}} = (1180 \pm 30) \text{ см}^3$ . Относительная погрешность может быть вычислена в обоих случаях как  $\varepsilon_V = \varepsilon_P + \varepsilon_{P_A}$ .  $\varepsilon_{V_{\text{фв}}} = 0,2$ ,  $\varepsilon_{V_{\text{вв}}} = 0,3$ .

## 4.2 Получение высокого вакуума и измерение скорости откачки

12. Установим ток в лампе  $I_0 = 0,6$  А.
13. После того, как давление упало ниже  $3 \cdot 10^{-2}$  торр, закроем К6 и установим ток  $I_{\text{max}} = 1,29$  А для нагревания масла.
14. Когда давление достигнет  $10^{-3}$  торр, включим ионизационный манометр.
15. По достижении  $1,6 \cdot 10^{-4}$  торр начнем дегазацию.
16. Получаем предельное давление  $P_{\text{пр}} = 7,5 \cdot 10^{-5}$  торр.
17. Остановим откачку и откроем кран К3. Снимем зависимость  $P(t)$  в процессе ухудшения, а затем в процессе улучшения вакуума.
18. Все результаты представим на графиках:

Из графиков 3 и 5 по МНК получаем коэффициенты прямых:

$$k_1 = (-0.203 \pm 0.090) \text{ с}^{-1}$$

$$k_2 = (-0.188 \pm 0.010) \text{ с}^{-1}$$

$$k_{\text{ср}} = (-0.195 \pm 0.011) \text{ с}^{-1}$$

Из формулы (3) приборная погрешность скорости откачки:

$$\sigma_W^{\text{приб}} = W \sqrt{\left(\frac{\sigma_{V_{\text{вв}}}}{V_{\text{вв}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{P-P_{\text{пред}}}}{(P-P_{\text{пред}}) \ln(P-P_{\text{пред}})}\right)^2}$$

$$\sigma_W = \sqrt{\sigma_W^{\text{случ}}^2 + \sigma_W^{\text{приб}}^2} = 50 \text{ см}^3/\text{с}$$

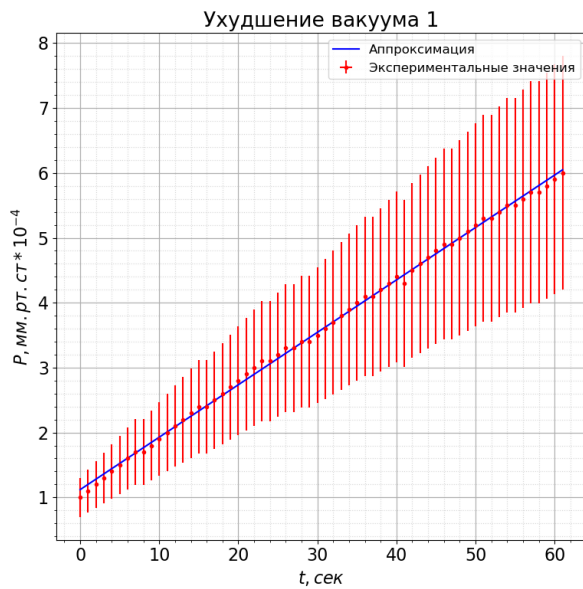


Рис. 2. Ухудшение вакуума 1

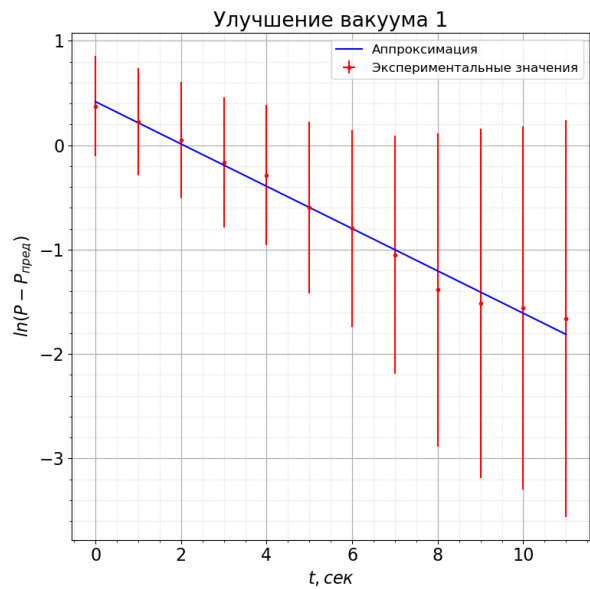


Рис. 3. Улучшение вакуума 1

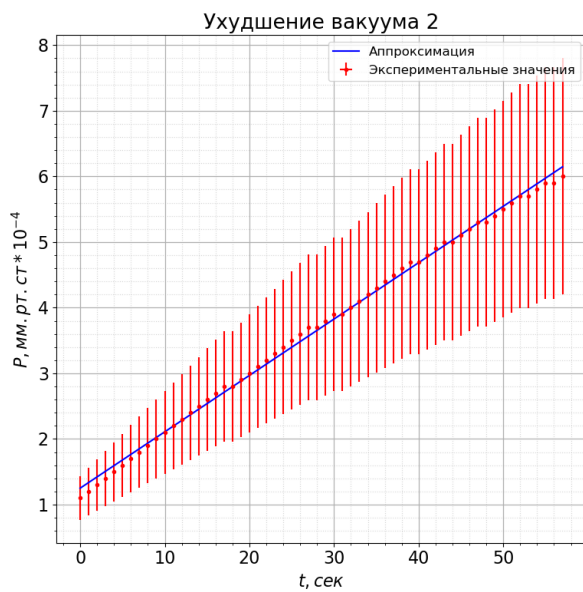


Рис. 4. Ухудшение вакуума 2

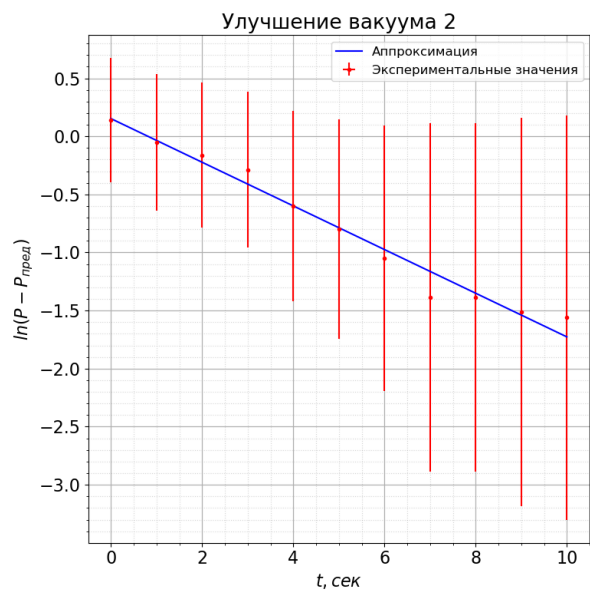


Рис. 5. Улучшение вакуума 2

Итого:

$$W = -k_{\text{ср}} * V_{\text{вв}} = (230 \pm 547) \text{ см}^3/\text{с}$$

19. Оценивим величину потока газа, поступающего из насоса назад в откачиваемую систему. Воспользуемся уравнением

$$V_{\text{вв}} dP = (Q_{\text{д}} + Q_{\text{и}}) dt$$

Получаем зависимость ( $k$  - средний из двух коэффициентов наклона прямых графиков в координатах  $P(t)$  при ухудшении вакуума)

$$Q_{\text{д}} + Q_{\text{и}} = k V_{\text{вв}}$$

$$k_1 = (1.011 \pm 0.009) * 10^{-5} \text{мм.рт.ст/с}$$

$$k_2 = (1.053 \pm 0.015) * 10^{-5} \text{мм.рт.ст/с}$$

$$k = (1.032 \pm 0.024) * 10^{-5} \text{мм.рт.ст/с}$$

Зная также, что  $P_{\text{перед}}W = Q_{\text{д}} + Q_{\text{и}} + Q_{\text{н}}$ , получим

$$\sigma_{Q_{\text{н}}} = \sqrt{\left(\frac{PV_{\text{вв}}}{t}\right)^2 \left(\left(\frac{\sigma_P}{P}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{V_{\text{вв}}}}{V_{\text{вв}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{t}\right)^2\right) + (P_{\text{перед}}W)^2 \left(\left(\frac{\sigma_{P_{\text{перед}}}}{P_{\text{перед}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_W}{W}\right)^2\right)}$$