

Работа 2.3.1  
Получение и измерение вакуума

## 1 Аннотация

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

**В работе используются:** вакуумная установка с манометрами: масляным, термометрическим и ионизационным.

## 2 Теоретические сведения

### 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

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

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

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

## 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 Используемое оборудование

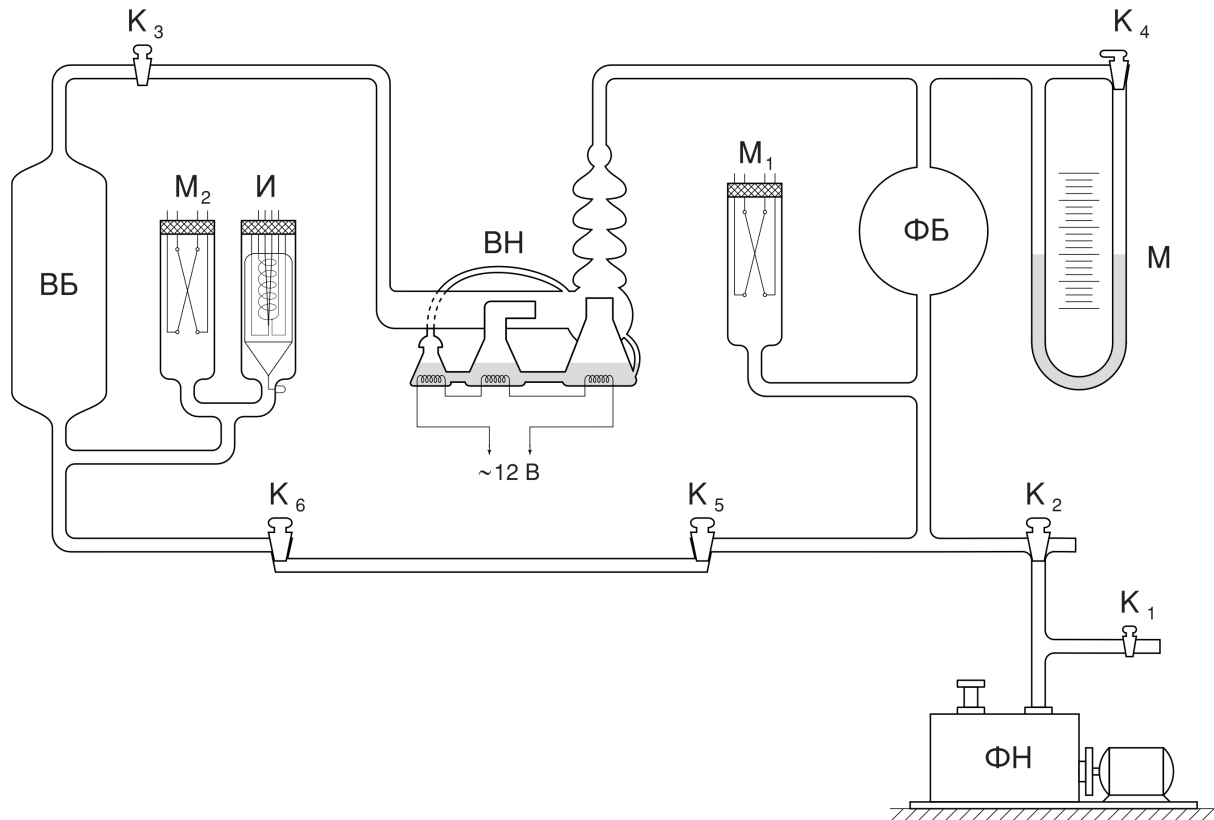


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

### 4 Методика измерений

1. Определим объемы форвакуумной и высоковакуумной частей установки. Сначала впустим атмосферу в установку. Запреем 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 ВБ. 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 (??) 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 (??), где положим  $P_1 := P_u$ ,  $P_2$  – давление в форвакуумной части.

## 5 Результаты измерений и обработка данных

### Параметры

$$g = 981.0 \pm 1.0 \text{ см/с}^2 \quad (8)$$

$$r = 0.040 \pm 0.005 \text{ см} \quad (9)$$

$$T_{\text{ком}} = 297.45 \pm 0.10 \text{ К} \quad (10)$$

$$P_{\text{атм}} = 98.390 \pm 0.010 \text{ кПа} \quad (11)$$

$$\rho = 0.8850 \pm 0.0010 \text{ г/см}^3 \quad (12)$$

$$V_{\text{зап}} = 50.0 \pm 1.0 \text{ см} \quad (13)$$

$$L = 10.0 \pm 1.0 \text{ см} \quad (14)$$

$$r = 0.040 \pm 0.005 \text{ см} \quad (15)$$

### Объём форвакуумной и высоковакуумной частей установки

Согласно закону Бойля-Мариотта:

$$P_{\text{атм}} V_{\text{зап}} = P_1 V_{\text{фв}} = P_2 (V_{\text{фв}} + V_{\text{вв}}), \quad (16)$$

Измеренные давления:

$$\Delta h_1 = 28.50 \pm 0.14 \text{ см} \quad (17)$$

$$\Delta h_2 = 18.20 \pm 0.14 \text{ см} \quad (18)$$

Зная объём «запертого» воздуха (13), найдем объём форвакуумной и высоковакуумной части:

$$V_{\text{фв}} = (1.99 \pm 0.04) \times 10^3 \text{ см}^3 \quad (19)$$

$$V_{\text{вв}} = 1125 \pm 35 \text{ см}^3 \quad (20)$$

### Скорость откачки

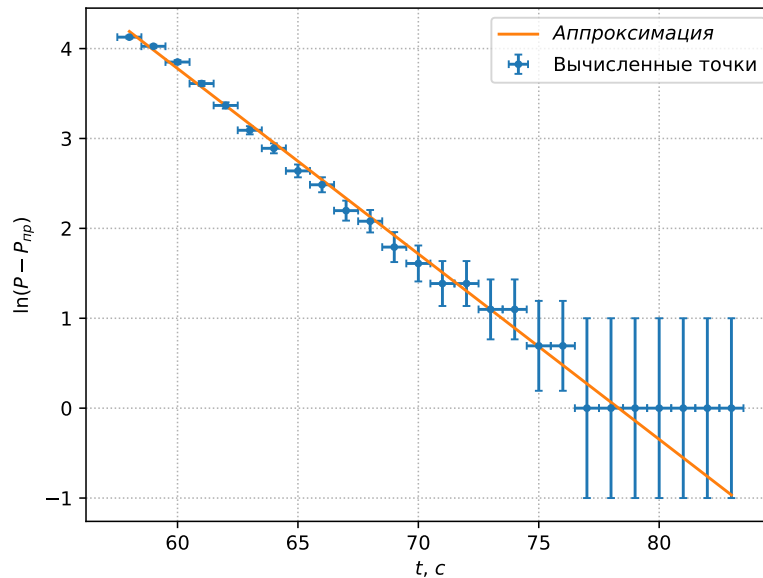


Рис. 2: Падение давления (опыт 1)

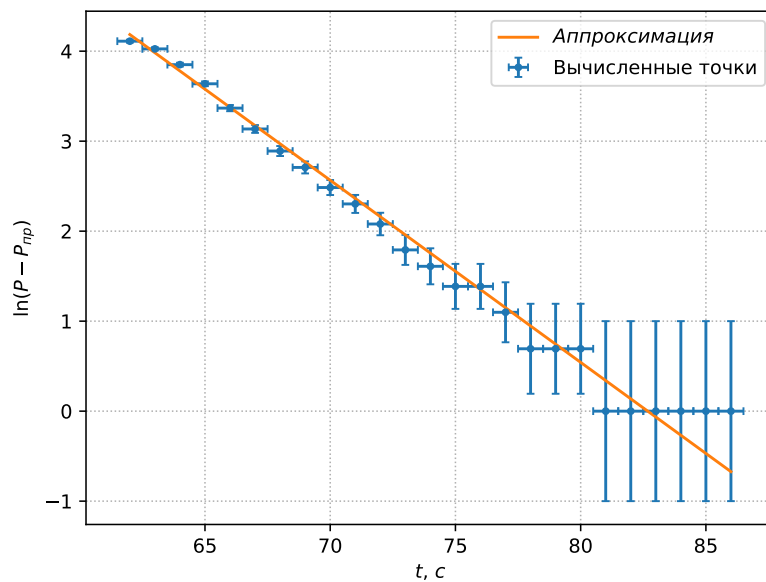


Рис. 3: Падение давления (опыт 2)

Из соотношения (4) и графиков (рис. 2) и (рис. 3):

$$W_1 = 232 \pm 9 \text{ см}^3/\text{с} \quad (21)$$

$$W_2 = 228 \pm 9 \text{ см}^3/\text{с} \quad (22)$$

## Поток газа из насоса

Из соотношения (1) и графиков (рис. 4) и (рис. 5):

$$Q_{\text{н}}^1 = (6.6 \pm 0.9) \times 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с} \quad (23)$$

$$Q_{\text{н}}^2 = (6.9 \pm 0.9) \times 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с} \quad (24)$$

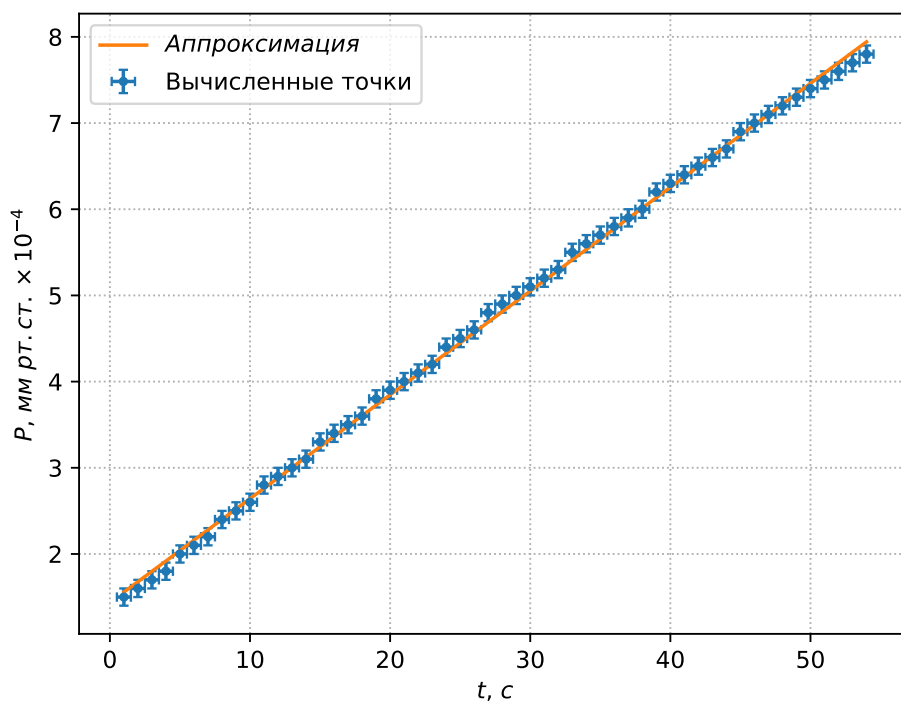


Рис. 4: Падение давления (опыт 1)

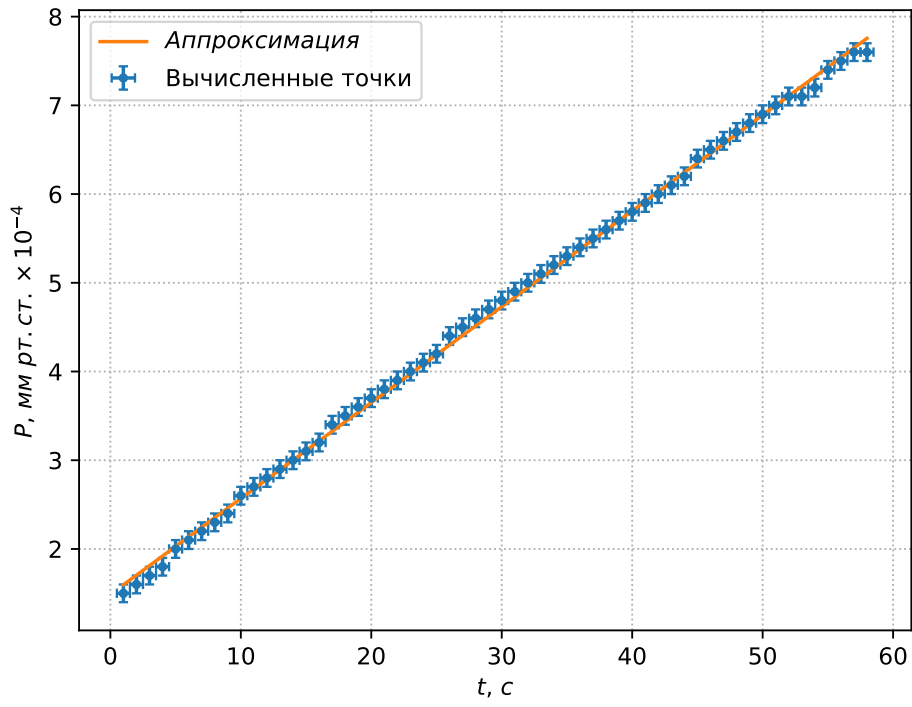


Рис. 5: Падение давления (опыт 2)

## Скорость откачки и искусственная течь

Давление при течи:

$$h_{\text{пр}} = 0.000140 \pm 0.000010 \text{ см} \quad (25)$$

$$h_{\text{уст}} = 0.000250 \pm 0.000010 \text{ см} \quad (26)$$

$$h_{\text{фв}} = 0.040000 \pm 0.000010 \text{ см} \quad (27)$$

Из соотношений (5) и (6):

$$W = (2.3 \pm 0.9) \times 10^2 \text{ см}^3/\text{с} \quad (28)$$