

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2.3.1

Получение и измерение вакуума

Автор: Алексей Домрачев 615 группа



23 мая 2017 г.

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

В работе используются: Вакуумная установка с манометрами: масляным, термоманометром и ионизационным.

Теория. С физической точки зрения низкий вакуум переходит в высокий, когда длина свободного пробега молекул становится сравнимой с размером установки (а течение газа сугубо молекулярным); сверхвысокий вакуум характерен важностью процессов адсорбции и десорбции частиц на поверхности вакуумной камеры.

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

Рабочие формулы. Объёмы частей установки будем рассчитывать с помощью закона Бойля–Мариотта для идеального газа: $PV = const$

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

$$-VdP = (PW - Q_d - Q_n - Q_{in})dt. \quad (1)$$

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 (при $P = P_{пр}$): $\frac{dP}{dt} = 0$, поэтому

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

Обычно Q_{in} постоянна, а Q_n и Q_d слабо зависят от времени, значит в условиях нашего эксперимента эти члены можно считать постоянными. Считая также постоянной W , проинтегрируем (1), используя (2), и получим:

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

где P_0 — начальное давление. $P_0 \gg P_{пр}$ поэтому можно записать, что

$$P = P_0\exp\left(-\frac{W}{V}t\right) + P_{пр} \Rightarrow \ln(P - P_{пр}) = -\frac{W}{V}t + \ln(P_0) \quad (4)$$

Следовательно, если построить график зависимости $\ln(P - P_{пр})(t)$ и вычислить его угловой коэффициент, то он будет равен $\tau = \frac{V}{W}$ — постоянная времени откачки, она является мерой эффективности откачной системы.

Экспериментальная установка Установка изготовлена из стекла и состоит из форвакуумного баллона, высоковакуумного диффузионного насоса, масляного и ионизационного манометров, термопарных манометров, форвакуумного насоса и соединительных кранов. Кроме того, в состав установки входит регулятор тока нагревателя диффузионного насоса.

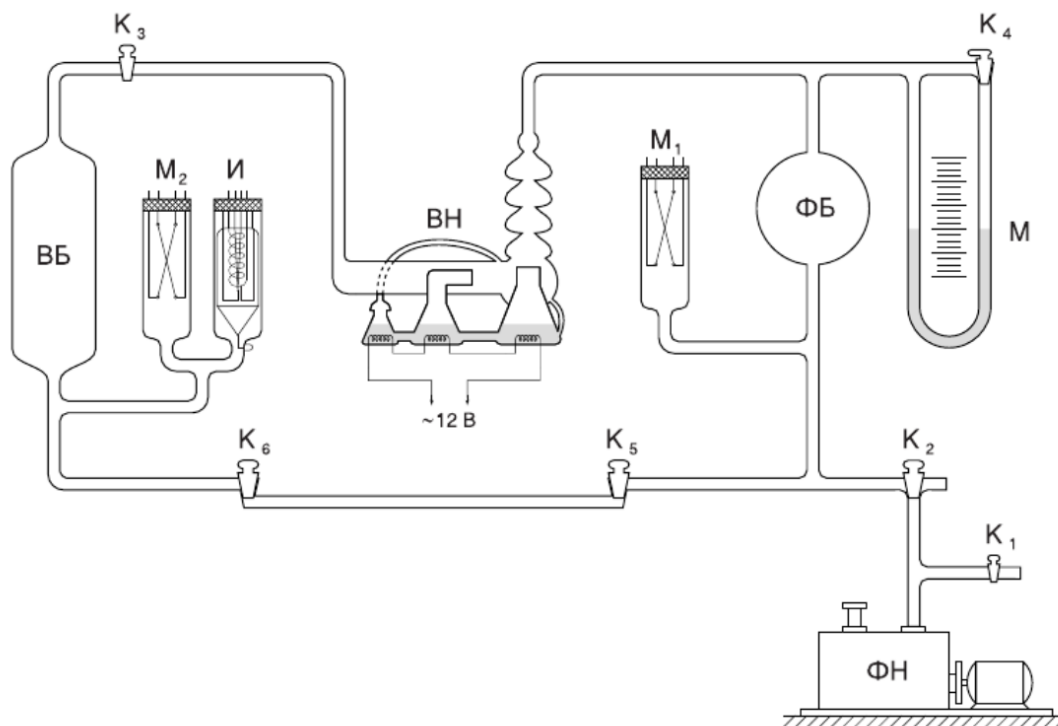


Рис. 1: Экспериментальная установка

Параметры установки и начальные условия

$$V_{\text{кап}} = (50 \pm 3) \text{ см}^3, \quad L_{\text{кап}} = 63 \text{ мм}, \quad d_{\text{кап}} = 0.9 \text{ мм}, \quad P_0 = 98150 \text{ Па}, \quad \rho_{\text{м}} = 0.885 \text{ г/см}^3$$

Определение объёма форвакуумной и высоковакуумной частей установки

1. Открыть все краны, кроме K_1 и K_2 .
2. Впустить в установку атмосферный воздух.
3. Закрыть K_5 и K_6 , заперев в капилляре воздух.
4. Откачать установку форвакуумным насосом до $4 \cdot 10^{-4}$ торр.
5. Отсоединить вакуумный насос от установки, выключить его, подать на него атмосферу.
6. Закрыть K_3 , отделив форвакуумную часть от высоковакуумной.
7. Закрыть K_4 , приведя в готовность масляный манометр.

8. Открыть K_5 .
9. Измерить давление масляным манометром $\Delta h_{\text{ФВ}} = (31.0 - 15.8)$ см масл. ст.
10. Открыть K_3 .
11. Измерить давление масляным манометром $\Delta h_{\text{П}} = (28.4 - 18.3)$ см масл. ст.
12. Открыть K_4 .

Получение высокого вакуума и измерение скорости откачки

1. Оставить установку без запертых частей, откачать форвакуумным насосом.
2. Включить термопарные вакуумметры.
3. Когда давление упало до $P_1 = 7 \cdot 10^{-3}$ торр, закрыть K_6 .
4. Включить нагреватель диффузионного насоса и подождать 10 минут.
5. Включить ионизационный манометр.
6. Измерить предельное давление в системе $P_{\text{пр}} = 72 \cdot 10^{-6}$ торр.
7. Измерить скорость откачки: - отключить откачку краном K_3 и подождать, пока вакуум достаточно ухудшится (10^{-3} торр), - открыть K_3 и фиксировать изменение показаний манометра со временем.
8. Измерить величину потока Q_n : перекроить K_3 и фиксировать изменение показаний со временем.
9. Повторить измерения пп. 7–8.
10. Открыть K_6 , дождаться установления давления: $P_{\text{уст}} = 1.4 \cdot 10^{-4}$ торр.
11. Выключить установку.

** – фиксация зависимостей производилась при помощи видеосъёмки.*

Обработка результатов

Объёмы

$$V_{\text{ФВ}} = V_{\text{кап}} \frac{P_0}{\rho_{\text{м}} g \Delta h_{\text{ФВ}}} = 3.7 \text{ л},$$

Объём высоковакуумной части равен разности объёмов обеих частей и форвакуумной части: $V = V_{\text{кап}} - V_{\text{ФВ}}$

$$V_{\text{ВВ}} = V_{\text{кап}} \frac{P_0}{\rho_{\text{м}} g} \left(\frac{1}{\Delta h_{\text{П}}} - \frac{1}{\Delta h_{\text{ФВ}}} \right) = 1.9 \text{ л}$$

Ухудшение вакуума Из паспорта вакуумметра ВИТ-2 узнали, что для перевода из мкА в торры надо полученное значение домножить на 100.

Таблица 1: Данные полученные при улучшении вакуума

$t, \text{с}$	$I_1 \cdot 10^{-1}, \text{мкА}$	$I_2 \cdot 10^{-1}, \text{мкА}$	$P \cdot 10^{-5}, \text{торр}$	$(P - P_{\text{пр}}) \cdot 10^{-5}, \text{торр}$	$\ln(P - P_{\text{пр}})$
0	78	74	76	68,8	4,23
1	62	58	60	52,8	3,97
2	50	53	51,5	44,3	3,79
3	38	41	39,5	32,3	3,48
4	30	33	31,5	24,3	3,19
5	24	26	25	17,8	2,88
6	22	25	23,5	16,3	2,79
7	18	19	18,5	11,3	2,42
8	16	17	16,5	9,3	2,23
9	12	12	12	4,8	1,57

По полученным данным построим график зависимости $\ln(P - P_{\text{пр}})$ от t

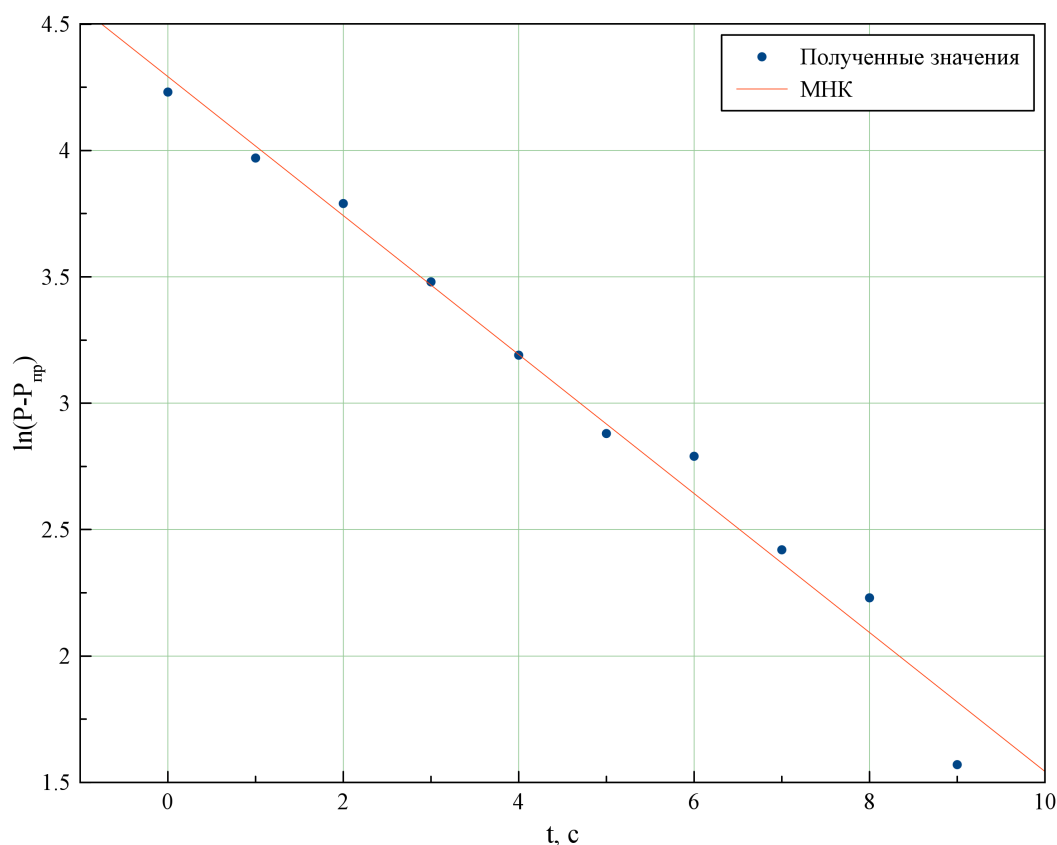


Рис. 2: График при улучшении вакуума

Посчитав с помощью МНК угловой коэффициент, получим $k = -2.7 \pm 0.1 \cdot 10^{-1}$
 Из уравнения (4) ясно, что $W = -k \cdot V_{\text{вв}} = 0.51 \pm 0.017 \frac{\text{л}}{\text{с}}$

Улучшение вакуума Теперь оценим величину потока Q_n

Таблица 2: Данные полученные при ухудшении вакуума

$t, \text{с}$	$I_1 \cdot 10^{-1}, \text{мкА}$	$I_2 \cdot 10^{-1}, \text{мкА}$	$P \cdot 10^{-5}, \text{торр}$
0	22	22	22
5	26	25	25,5
10	30	30	30
15	34	34	34
20	38	39	38,5
25	44	44	44
30	48	47	47,5
35	52	53	52,5
40	56	56	56
45	60	60	60
50	64	65	64,5
55	68	68	68
60	72	72	72
65	76	75	75,5

По полученным данным построим график зависимости P от t

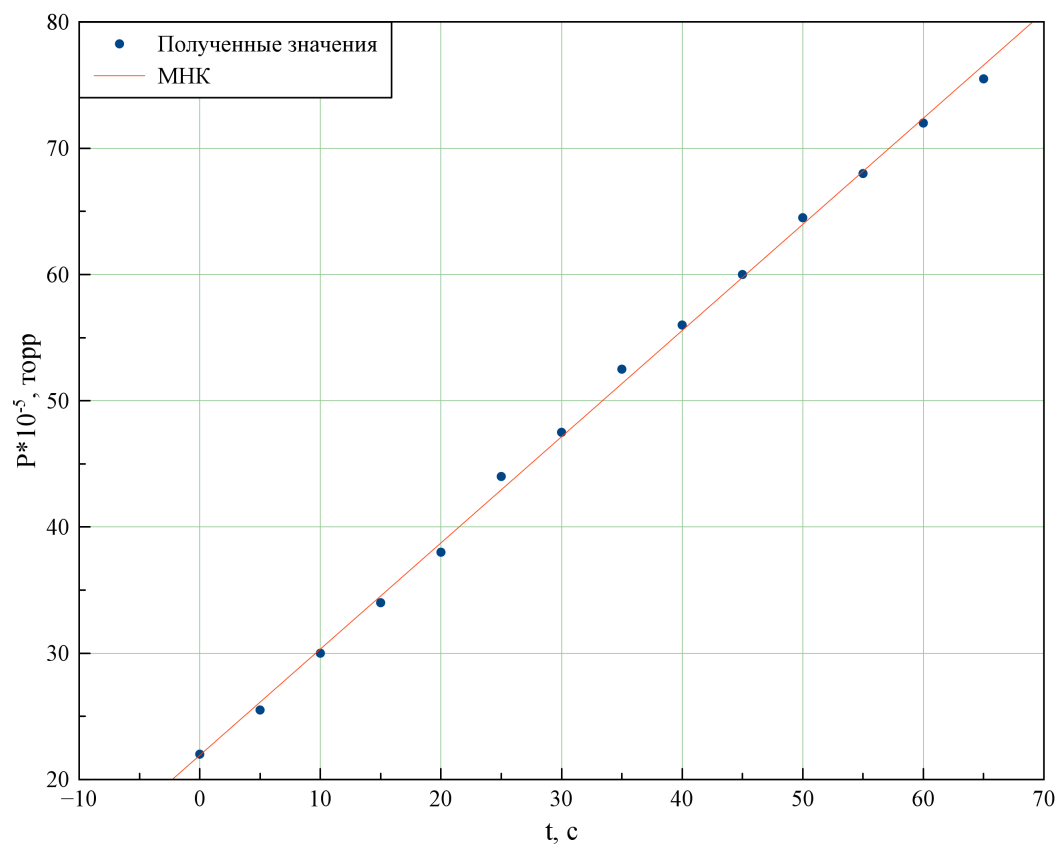


Рис. 3: График при ухудшении вакуума

Посчитав с помощью МНК угловой коэффициент, получим $k = 8.4 \pm 0.01 \cdot 10^{-6} \frac{\text{торр}}{\text{с}}$. Мы знаем, что в этом случае (без откачки) изменение давления во времени описывается уравнением (1). Тогда $Q_d + Q_n = kV_{\text{вв}}$. Также $Q_n = P_{\text{пр}}W - Q_d - Q_i$. Значит $Q_n = P_{\text{пр}}W - kV_{\text{вв}} = 2.1 \cdot 10^{-5} \frac{\text{торр} \cdot \text{м}^3}{\text{с}}$, а $\sigma_{Q_n} = Q_n \sqrt{\varepsilon_k^2 + \varepsilon_W^2} = 0.1 \cdot 10^{-5} \frac{\text{торр} \cdot \text{м}^3}{\text{с}}$. В итоге $Q_n = 2.1 \pm 0.1 \cdot 10^{-5} \frac{\text{торр} \cdot \text{м}^3}{\text{с}}$.

Производительность насоса Рассчитаем производительность насоса по различию $P_{\text{уст}}$ и $P_{\text{пр}}$. Для этого используем формулу течения газа через трубу:

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

Запишем формулу (2) для случаев, когда капилляр перекрыт и когда он открыт:

$$P_{\text{пр}}W = Q_1, P_{\text{уст}} = Q_1 + \frac{d(PV)_{\text{капилл}}}{dt} \quad (6)$$

Q_1 — сумма всех натеканий, исключив её найдем W :

$$W = \frac{4}{3}r^3 \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \frac{P_{\text{ФВ}} - P_{\text{уст}}}{(P_{\text{уст}} - P_{\text{пр}})L} = 0.41 \frac{\text{л}}{\text{с}} \quad (7)$$

Подведение итогов Были измерены объёмы форвакуумной и высоковакуумной частей установки: $V_{\text{ФВ}} = 3.7 \text{ м}^3$, $V_{\text{вв}} = 1.9 \text{ м}^3$. Была рассчитана скорость откачки системы W двумя способами, при это полученные данные близки $W_{\text{ухуд.}} = 0.41 \frac{\text{л}}{\text{с}}$, $W_{\text{улучш.}} = 0.51 \frac{\text{л}}{\text{с}}$.