

# Отчет о выполнении лабораторной работы 2.4.1

## Определение теплоты испарения жидкости

Выполнил: Дедков Денис, группа Б01-109

28.02.2022

### Цель работы

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

### Оборудование и приборы

Экспериментальный стенд на основе компактного безмасляного высоковакуумного откачного поста Pfeiffer Vacuum серии HiCube 80 Eco с диафрагменным и турбомолекулярным насосами, вакуумметров Pfeiffer Vacuum серии DigiLine, и вакуумных быстроразъёмных компонентов. Блок управления (цифровой интерфейс RS-485).

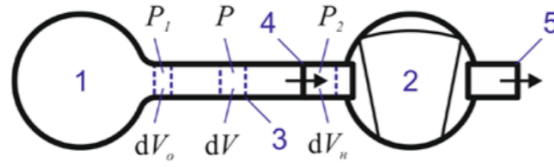
### Теоретическое введение

В физике вакуумом называют состояние газа, при котором характерная длина свободного пробега молекул в газе  $\lambda$  сравнима по порядку величины с характерным линейным размером сосуда  $d$ , в котором газ находится.

Основы процесса откачки и связанные с ним понятия рассмотрим на примере простейшей вакуумной системы.

Предельное остаточное давление (предельный вакуум)  $P_{\text{пр}}$  – наименьшее давление газа, которое формируется в процессе откачки в рассматриваемом сечении вакуумпровода (рассматриваемой точке вакуумной системы). Обычно выделяют предельное давление в камере или на входе в насос.

Наибольшее выпускное давление – максимально допустимое давление газа на входе насоса.



1 — откачиваемый объём, 2 — вакуумный насос, 3 — вакуумпровод (трубка),  
4 — впускной патрубок (вход) насоса, 5 — выпускной патрубок (выход) насоса

Рис. 1: Простейшая вакуумная система

Быстрота откачивающего действия (скорость откачки) вакуумной системы  $S$  – объем газа, проходящий через рассматриваемое сечение вакуумпровода в единицу времени при текущем давлении в данном сечении:

$$S = \frac{dV}{dT} \quad (1)$$

Следовательно, быстродействие насоса  $S_n$  определяется как:

$$S_n = \frac{dV_n}{dT} \quad (2)$$

а эффективная скорость откачки камеры  $S_o$ :

$$S_o = \frac{dV_o}{dT} \quad (3)$$

Падение давления вдоль вакуумпровода  $\Delta P = P_1 - P_2$  определяется его пропускной способностью (проводимостью)  $U$ :

$$U = \frac{Q}{P_1 - P_2} \quad (4)$$

где  $Q$  – поток газа через вакуумпровод с соответствующими давлениями на концах.

Величина  $Z$ , обратная проводимости, называется импедансом вакуумпровода:

$$Z = \frac{1}{U} \quad (5)$$

В общем случае указанные величины  $S, U, Q, Z$  как и сами давления  $P_1$  и  $P_2$  зависят от времени. Но в конце процесса откачки устанавливается квазистационарный режим, при котором поток газа становится практически постоянным и равным количеству поступающего в систему

газа в единицу времени вследствие наличия течей, т.е. нарушения герметичности (в основном в местах механического соединения отдельных узлов вакуумной системы). Для стационарного режима можно записать условие непрерывности потока откачиваемого газа:

$$P_1 S_o = P S = P_2 S_n = Q \quad (6)$$

Из предыдущих уравнений легко получить, что

$$\frac{1}{S_o} = \frac{1}{S_n} + \frac{1}{U} \quad (7)$$

Это уравнение позволяет правильно ориентироваться в выборе средств откачки и вакуумпроводов при конструировании вакуумной системы для любых целей.

Количественной характеристикой течи, является натекание  $Q_n$ , измеряемое при отключенных средствах откачки:

$$Q_n = V \frac{P_k - P_n}{\Delta t} \quad (8)$$

где  $V$  – замкнутый исследуемый объём;  $P_n$ ,  $P_k$  – начальное и конечное давление в объёме;  $\Delta t$  – время между измерениями давления. При наличии течей, нормальной работе средств откачки и отсутствии в системе источников паров или газов, зависимость потока газа через течь от времени  $Q_n(t)$  носит, как правило, линейный характер.

Для заданного давления  $P_1$  в замкнутом исследуемом объёме допустимым считается натекание:

$$Q_n \ll Q = P_1 S_o = P_1 \frac{S_n U}{S_n + U} \quad (9)$$

На пропускную способность вакуумпровода существенно влияет режим течения газа, который характеризуется числом Кнудсена, равным отношению длины свободного пробега молекул в газе к характерному линейному размеру течения:

$$Kn = \frac{\lambda}{d} \quad (10)$$

Данная величина характеризует степень разреженности газового потока:

1. В гидродинамическом (вязкостном) режиме течения ( $Kn \ll 1$ ) различают ламинарные и турбулентные потоки. При ламинарном течении молекулы газа движутся по параллельным траекториям со

скоростями, мало отличающимися друг от друга. При турбулентном течении наряду с поступательным движением всей массы газа, молекулы движутся хаотически со скоростями, подвергающимися случайным изменениям

2. В молекулярном (кнудсеновском) режиме ( $Kn \gg 1$ ) течение газа сводится к независимому движению отдельных молекул по прямым линиям в периоды между соударениями главным образом со стенками вакуумпровода.
3. В переходном режиме ( $Kn \sim 1$ ) в системе могут существовать все описанные выше виды течения.

В разных режимах течения пропускная способность вакуумпровода имеет существенно различные зависимости от размера его поперечного сечения.

Положим, что за промежуток времени  $dt$  давление в откачиваемом объёме  $V_o$  снижается на  $dP_1$ . Тогда за промежуток времени  $dt$  количество газа поступающего в трубку равно  $S_o P_1 dt$ , а эта же убыль газа в объёме равна  $V_o dP_1$ , следовательно:

$$dt = -\frac{V_o dP_1}{S_o P_1} \quad (11)$$

В случае  $S_o = const$  имеем

$$P(t) = P_1 \exp\left(-\frac{S_o}{V_o} t\right) \quad (12)$$

## Экспериментальная установка

Экспериментальный стенд выполнен на основе компактного безмасляного высоковакуумного откачного поста Pfeiffer Vacuum серии HiCube 80 Eco с диафрагменным и турбомолекулярным насосами, вакуумметров Pfeiffer Vacuum серии DigiLine, и вакуумных быстроразъёмных компонентов. Управление основными функциями откачного поста, контроль и запись параметров установки осуществляется блоком управления (БУ) через цифровой интерфейс RS-485 с помощью специального программного обеспечения PV TurboViewer.

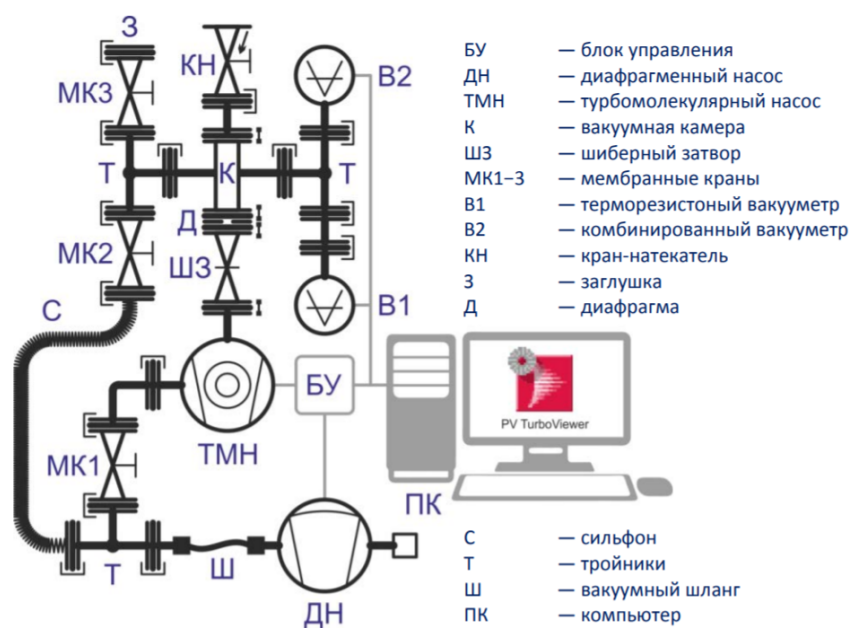


Рис. 2: Схема экспериментального стенда

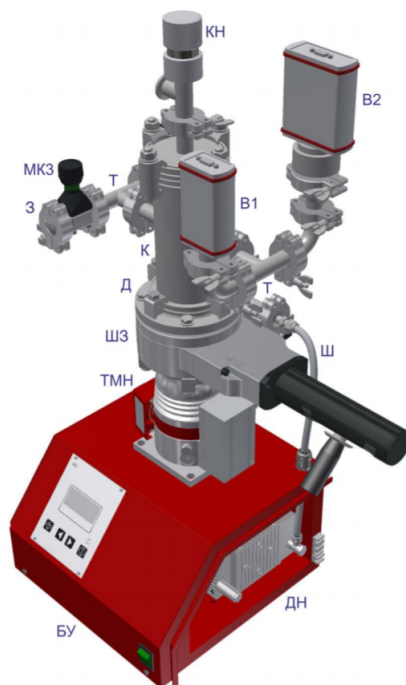


Рис. 3: Внешний вид экспериментального стенда

Соединительный фланец	DN 16 ISO-KF
Максимальное измеряемое давление	$10^5$ Па   750 Торр   1000 мбар
Минимальное измеряемое давление	$10^{-2}$ Па   $7,5 \cdot 10^{-5}$ Торр   $1 \cdot 10^{-4}$ мбар
Точность измерений	в диапазоне $1 \cdot 10^{-3} - 1$ мбар : $\pm 5\%$
Метод измерений	датчик Пирани, терморезисторный вакуумметр
Цикл измерений	40 мс
Интерфейс управления	RS-485 / RS-232

Рис. 4: Технические характеристики вакуумметра В1

Соединительный фланец	DN 25 ISO-KF
Максимальное измеряемое давление	$10^5$ Па   750 Торр   1000 мбар
Минимальное измеряемое давление	$5 \cdot 10^{-7}$ Па   $3,75 \cdot 10^{-9}$ Торр   $5 \cdot 10^{-9}$ мбар
Точность измерений	в диапазоне $1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-3}$ мбар : $\pm 25\%$ в диапазоне $1 \cdot 10^{-2} - 100$ мбар : $\pm 15\%$
Метод измерений	датчик Пирани, терморезисторный вакуумметр / ионизационный датчик с холодным катодом
Цикл измерений	40 мс
Интерфейс управления	RS-485 / RS-232

Рис. 5: Технические характеристики вакуумметра В2

## Ход работы

### Определение объемов частей установки

Присоединяя часть известного объёма к установке, можно измерить давление до и после, из закона Бойля-Мариотта получить сам объём кранов установки.

Для этого сделаем следующее:

1. Откачаем установку форвакуумным насосом ДН.
2. Присоединим к установке сиффон с воздухом при атмосферном давлении.
3. Выравним давления в сиффоне С и вакуумной камере К экспериментального стенда.
4. Выравним давление вакуумной камеры К и форвакуумной магистрали установки.
5. Выравним давление во всей установке, включая объём турбомолекулярного насоса ТМН.

6. Зафиксируем установившиеся показания вакуумметров.

На каждом этапе выравнивания давления фиксируем его. Было проведено 2 измерения, результаты которых занесены в таблицу 1.

Погрешности определим, используя технические характеристики вакуумметра В2 (см. таблицу 5)

	1	2
Действие	$p$ , мбар	$p$ , мбар
Откачка ДН	4.0	3,7
Открытие МК3	220	180
Открытие МК2	180	170
Открытие МК1	120	120

Таблица 1: Результаты измерения давления при различных конфигурациях системы

Откуда получаем для объемов следующие значения (см. таблицу 2).

Объем	$(V \pm \sigma_V)$ , мл
Полной установки	$1943 \pm 97$
Высоковакуумной части (камера К)	$1293 \pm 65$
Форвакуумной магистрали	$649 \pm 32$

Таблица 2: Объемы частей установки

Теперь сделаем следующее:

1. Отсоединим сильфон от установки.
2. Откачаем установку форвакуумным насосом ДН.
3. Откачаем объём турбомолекулярным насосом ТМН.
4. Видно, что терморезисторный вакуумметр 1 достиг своего предела измерений, в то время как комбинированный вакуумметр 2 (точнее его магнетронная часть) продолжает отображать корректное давление в системе. Зафиксируйте предельное давление в высоковакуумной части установки и время откачки установки насосом ТМН.

5. Определим уровень течей и скорость откачки системы. Для этого закроем шибер ШЗ, при этом давление в системе начнёт повышаться за счёт наличия течей. Получим таким образом зависимость показаний вакуумметра 2 от времени. Когда давление превысит  $3 \cdot 10^{-3}$  мбар, снова откроем шибер. Получим зависимость показаний вакуумметра 2 от времени после открытия шибера. Снова зафиксируем предельное давление.

### Оценка эффективной скорости откачки системы форвакуумным насосом (ДН)

Мы получили зависимость  $p(t)$  при откачке системы ДН. Графики этих зависимостей для разных вакуумметров приведены на рисунке 6. Из графика можно сделать вывод, что для определения постоянной времени откачки следует брать показания вакуумметра В1. Строим график  $\ln p(t)$  (см. рис. 7) и находим параметры полученной кривой **методом наименьших квадратов**. Вся статистическая обработка занесена в таблицу 3.

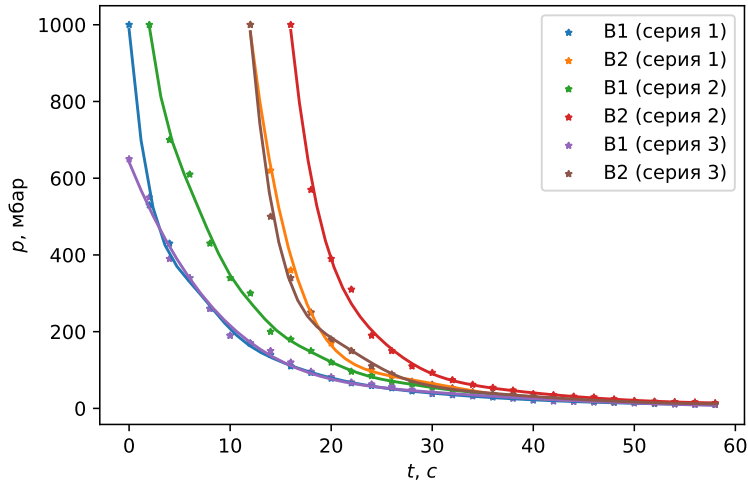


Рис. 6: График зависимости  $p(t)$  ДН



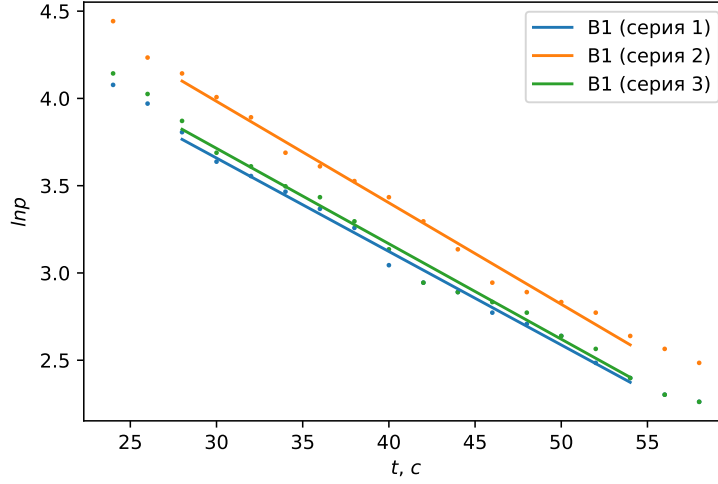


Рис. 7: График зависимости  $\ln p(t)$  ДН вакуумметра В1

Серия	$a \pm \sigma_a$	$b \pm \sigma_b$
1	$-0.05354 \pm 0.002720$	$5.265 \pm 4.750$
2	$-0.05813 \pm 0.003382$	$5.727 \pm 5.904$
3	$-0.05466 \pm 0.003204$	$5.354 \pm 5.594$

Таблица 3: Обработка для  $Q(P)$

Систематическую погрешность оценим, как разность коэффициентов наклона графиков. Полную погрешность - как квадратичную сумму случайной и систематической:

$$\sigma_{S_0} = \frac{S_0}{a} \sqrt{\sigma_a^2 + \Delta a^2} = S_0 \sqrt{0.06^2 + 0.08^2} = 0.1 S_0$$

$$S_0 = -aV_0 = (0.39 \pm 0.04) \frac{\text{л}}{\text{с}}$$

### Оценка эффективной скорости откачки системы турбомолекулярным (ТМН) насосом

Аналогичное рассмотрение зависимости  $p(t)$  при откачке системы ТМН, а также статистическая обработка результатов приведена на графике 8 и в таблице 4.

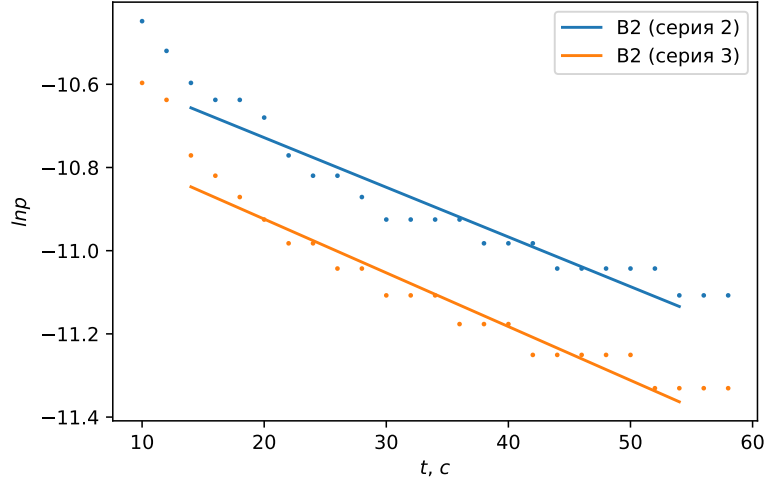


Рис. 8: График зависимости  $\ln p(t)$  ТМН вакууметра В2

Серия	$a \pm \sigma_a$	$b \pm \sigma_b$
2	$-0.01194 \pm 0.001593$	$-10.49 \pm 2.076$
3	$-0.01292 \pm 0.001352$	$-10.67 \pm 1.762$

Таблица 4: Обработка для  $Q(P)$

Аналогично систематическую погрешность оценим, как разность коэффициентов наклона графиков. Полную погрешность - как квадратичную сумму случайной и систематической:

$$\sigma_{S_0} = \frac{S_0}{a} \sqrt{\sigma_a^2 + \Delta a^2} = S_0 \sqrt{0.13^2 + 0.08^2} = 0.15 S_0$$

$$S_0 = -a V_k = (0.016 \pm 0.003) \frac{\text{л}}{\text{с}}$$

### Определение уровня течей по ухудшению вакуума после перекрытия откачки насосом ТМН

График зависимости  $Q_{\text{н}}(t)$  приведен на рисунке 9.

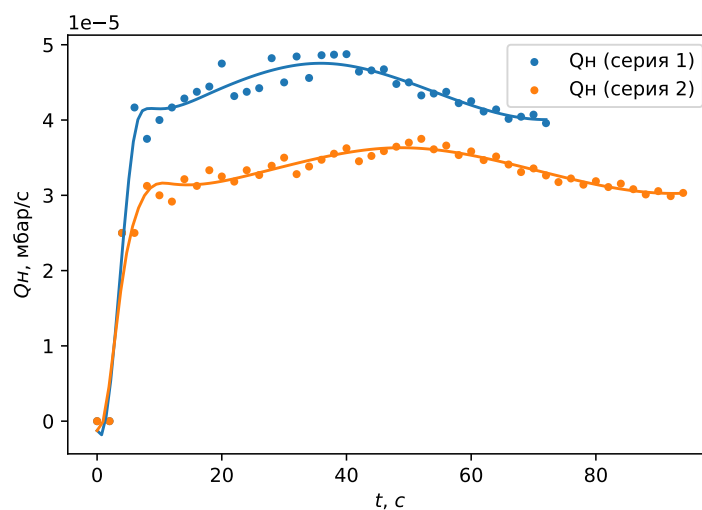


Рис. 9: График зависимости  $Q_n(t)$  вакуумметра В1

Для численной оценки натекания построим график  $p(t)$  после перекрытия откачки насосом ТМН. По угловому коэффициенту определим натекание. Вся статистическая обработка занесена в таблицу 5.

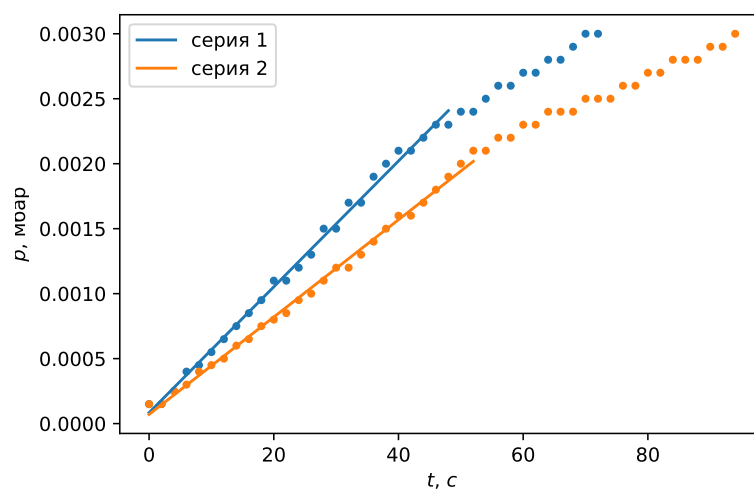


Рис. 10: График зависимости  $P(t)$  вакуумметра В1 после перекрытия откачки насосом ТМН

Серия	$a \pm \sigma_a$	$b \pm \sigma_b$
1	$4.842e-05 \pm 1.377e-06$	$8.385e-05 \pm 0.001079$
2	$3.745e-05 \pm 9.298e-07$	$7.063e-05 \pm 0.0008542$

Таблица 5: Обработка зависимости  $P(t)$  вакуумметра В1 после перекрытия откачки насосом ТМН

Откуда получаем величины оценку натекания:

$$Q_n = (5.5 \pm 0.3) \cdot 10^{-5} \frac{\text{л} \cdot \text{мбар}}{\text{ч}} \ll PS_0$$

## Вывод

Получены вполне правдоподобные результаты.

Оценка погрешностей была проведена более тщательно, была приведена оценка систематической ошибки. Которую можно оценить, благодаря нескольким сериям одних и тех же измерений.

Эффективная скорость откачки системы форвакуумным насосом достаточно хорошо согласуется с технической характеристикой насоса MVP 015:

$$S_0 = (0.39 \pm 0.04) \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}, \text{ техн. хар. } 0.50 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$$

Получена оценка эффективной скорости откачки системы турбомолекулярным (ТМН) насосом:

$$S_0 = (0.016 \pm 0.003) \frac{\text{л}}{\text{с}}$$

Также проведен качественный анализ натекания в системе:

$$Q_n = (5.5 \pm 0.3) \cdot 10^{-5} \frac{\text{л} \cdot \text{мбар}}{\text{ч}} \ll PS_0$$