

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа аэрокосмических технологий

Отчёт о выполнении лабораторной работы

2.3.1

Получение и измерение вакуума

Соболевский Федор Александрович
Б03-109

Февраль 2022

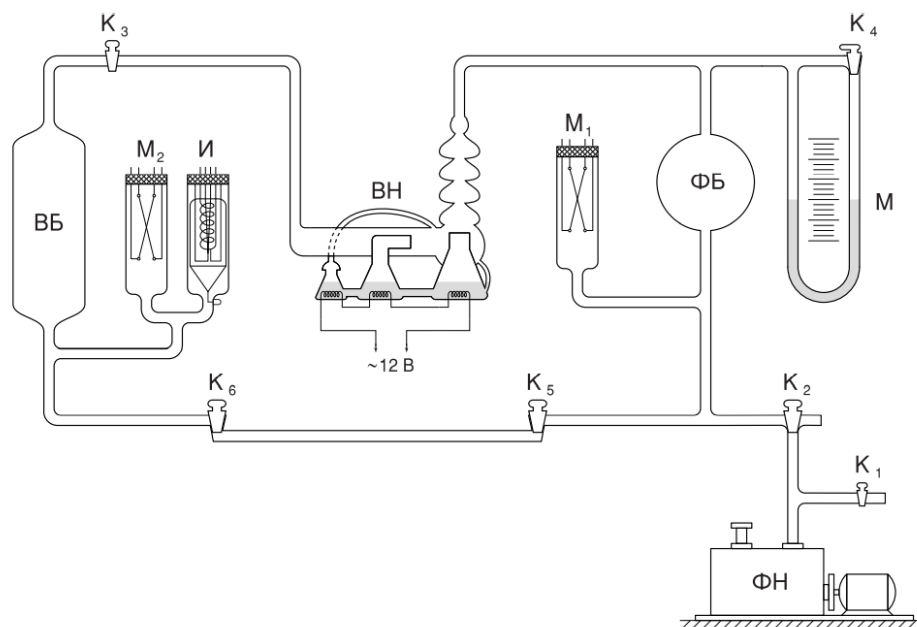


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

1 Аннотация

В данной работе исследовано получение вакуума различной степени разрежения с помощью механического форвакуумного и диффузионного масляного насосов. Применены различные методы измерения вакуума при давлении в диапазоне от 10^{-2} до 10^{-5} торр. С помощью основных термодинамических соотношений измерены объёмы вакуумных баллонов и скорости откачки системы в разных режимах работы.

2 Теоретические сведения

2.1 Понятие вакуума

Вакуум - пространство, свободное от вещества. В прикладной физике под вакуумом понимают среду, состоящую из газа при давлении значительно ниже атмосферного. По степени разреженности газа различают форвакуум (до $10^{-2} - 10^{-3}$ торр), высокий вакуум ($10^{-4} - 10^{-7}$ торр) и сверхвысокий вакуум ($10^{-8} - 10^{-11}$ торр). В данной работе исследованы способы получения и измерения форвакуума и высокого вакуума.

2.2 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, термодинамических 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 входит вариатор для регулирования тока нагревателя диффузионного насоса.

Трёхходовой кран K_2 используется для соединения форвакуумного насоса с установкой или атмосферой. Кран K_3 отделяет высоковакуумную часть установки от форвакуумной. Кран K_4 соединяет между собой колена манометра. Краны K_5 и K_6 стоят по концам капилляра, разделяющего форвакуумную и высоковакуумную части установки.

Устройство и принцип действия форвакуумного насоса, используемого в данной работе, показаны на рис. 2. В цилиндрической полости массивного корпуса размещен эксцентрично ротор, постоянно соприкасающийся своей верхней частью с корпусом. В диаметральный разрез ротора

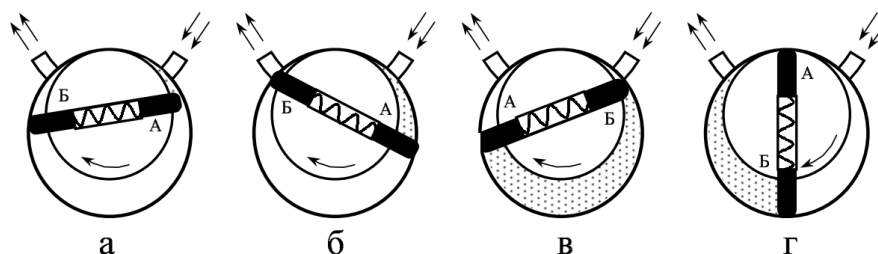


Рис. 2: Схема действия ротационного двухпластинчатого форвакуумного насоса

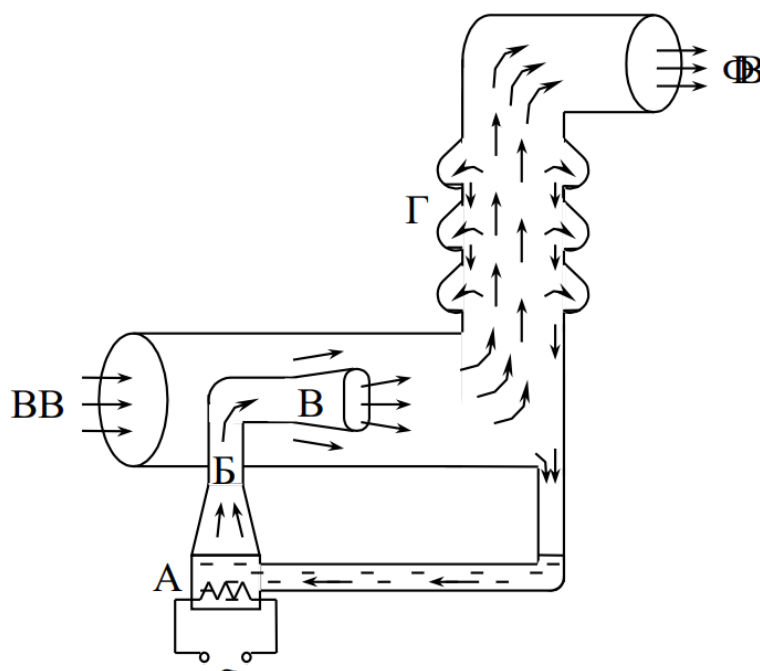


Рис. 3: Схема работы диффузионного насоса

вставлены две пластины, раздвигаемые пружиной и плотно прижимаемые к поверхности полости. В положениях «а» и «б» пластина «А» засасывает разреженный воздух из откачиваемого объема, а пластина «Б» вытесняет ранее захваченный воздух в атмосферу. В положениях «в» и «г» пластины меняются ролями.

Откачивающее действие диффузионного насоса основано на диффузии (внедрении) молекул разреженного воздуха в струю паров масла. Попавшие в струю молекулы газа увлекаются ею и уже не возвращаются назад. На прежнем их месте образуется пустота, которая немедленно заполняется следующими порциями газа, увеличивая степень разрежения газа в окрестности струи и оказывая таким образом сильное откачивающее воздействие на весь газ в откачиваемом объеме. Скорость откачки диффузионных насосов в сотни и тысячи раз превосходит скорость откачки форвакуумного насоса.

Устройство одной ступени масляного диффузионного насоса схематически показано на рис. 3. Масло, налитое в сосуд А, подогревается электрической печкой. Пары масла поднимаются по трубе Б и вырываются из сопла В. Струя паров увлекает молекулы газа, которые поступают из откачиваемого сосуда через трубку ВВ. Дальше смесь попадает в вертикальную трубу Г. Здесь масло осаждается на стенках трубы и маслосборников и стекает вниз, а оставшийся газ через трубу ФВ откачивается форвакуумным насосом.

Диффузионный насос, используемый в данном опыте, имеет две ступени и соответственно два сопла. Одно сопло вертикальное (первая ступень), второе сопло горизонтальное (вторая ступень). За второй ступенью имеется еще одна печь, пар из которой поступает не в сопло, а

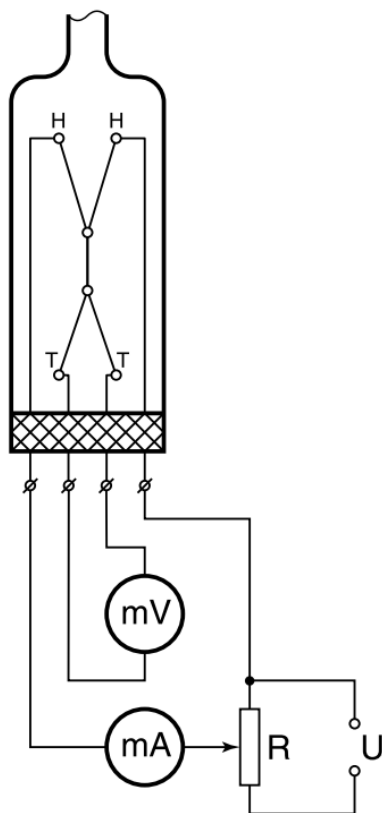


Рис. 4: Схема устройства термопарного манометра ПМТ-2

по тонкой трубке подводится ближе к печке первой ступени. Данная печь осуществляет фракционирование масла. Легколетучие фракции масла, испаряясь, поступают в первую ступень, обогащая ее легколетучей фракцией масла. Таким образом, первая ступень, плотность струи которой выше, начинает откачивать при более высоком давлении в форвакуумной части установки. Вторая ступень обогащается малолетучими фракциями. Плотность струи второй ступени меньше, но меньше и давление насыщенных паров масла в этой ступени. Соответственно в откачиваемый объем поступает меньше паров масла и его удастся откачать до более высокого вакуума, чем при использовании одноступенчатого диффузионного насоса.

Масляный манометр М (см. рис. 1) представляет собой U-образную трубку, до половины наполненную вязким маслом, обладающим достаточно низким давлением насыщенных паров. По разности уровней масла определяется разность давлений в коленах трубки. Так как плотность масла мала, $\rho = 0,9 \text{ г/см}^3$, то при помощи манометра можно измерить только небольшие разности давлений (до нескольких торр).

Чувствительным элементом термопарного манометра является платино-платинородиевая термопара, спаянная с никелевой нитью накала и заключенная в стеклянный баллон (лампа ПМТ-2). Устройство термопары показано на рис. 4. По нити накала НН пропускается ток постоянной величины. Для установки тока служит потенциометр R. Термопара ТТ присоединяется к милливольтметру, показания которого определяются температурой нити накала и зависят от отдачи тепла в окружающее пространство. Потери тепла определяются теплопроводностью нити и термопары, теплопроводностью газа, переносом тепла конвективными потоками газа внутри лампы и теплоизлучением нити (инфракрасное тепловое излучение). В обычном режиме лампы основную роль играет теплопроводность газа. При давлениях > 1 торр теплопроводность газа, а вместе с ней и ЭДС термопары практически не зависят от давления газа, и прибор не работает.

При улучшении вакуума средняя длина свободного пробега молекул становится сравнимой с диаметром нити, теплоотвод падает и температура спая возрастает. При вакууме 10^{-3} торр теплоотвод, осуществляемый газом, становится сравнимым с другими видами потерь тепла и

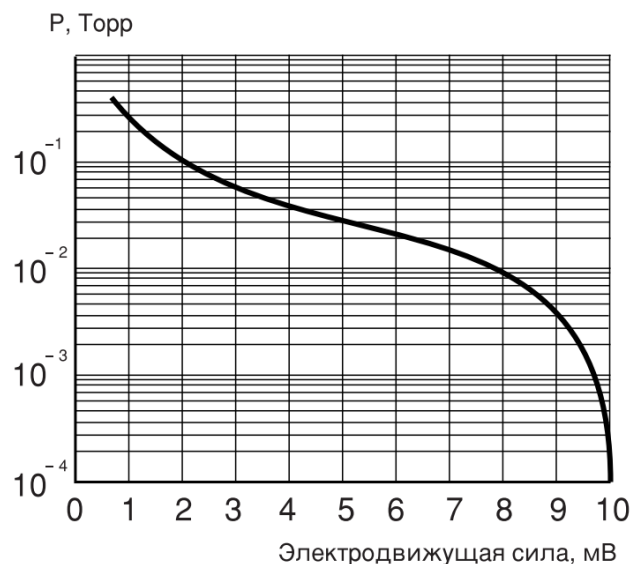


Рис. 5: Градуировочная кривая термопары ПМТ-2

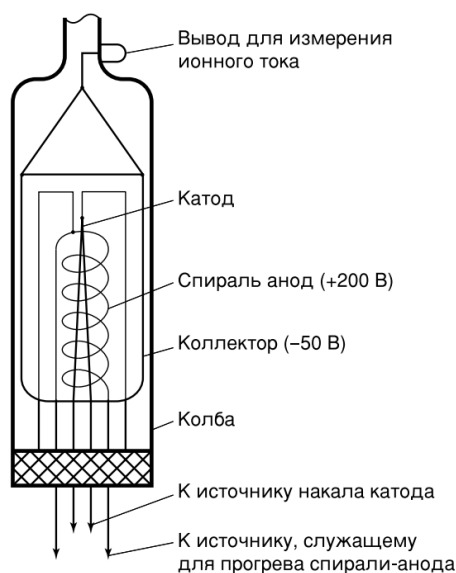


Рис. 6: Схема ионизационной лампы ЛМ-2

температура нити становится практически постоянной. На рис. 5 приведена градуировочная кривая термопары ПМТ-2.

Ионизационный манометр представляет собой трёхэлектродную лампу (см. рис. 6). Электроны испускаются катодом и увлекаются электрическим полем к аноду, имеющему вид редкой спирали, за витки которой электроны проскакивают и, замедляясь полем коллектора, возвращаются назад. Прежде чем осесть на аноде, электроны многократно пересекают пространство между катодом и коллектором, ионизируя частицы газа на своём пути. Ионы притягиваются полем коллектора и определяют его ток, который оказывается пропорциональным плотности газа и, следовательно, может служить мерой давления. Калибровка манометра верна, если остаточным газом в колбе является воздух. При давлении выше 10^{-3} катод манометра перегорает, поэтому данный прибор применим только для измерения очень малых величин давления.

2.3 Процесс откачки

Мерой производительности насоса является скорость откачки W : $[W] = 1 \text{ л/с}$ - объём газа, удаляемого из сосуда за единицу времени. Скорость откачки форвакуумного насоса можно

считать равной объёму воздуха заборной камеры, умноженному на число оборотов в секунду.

Рассмотрим обычную схему откачки. Обозначим величины, характеризующие поступление газа обратно в систему в единицу времени: Q_1 - количество газа, десорбирующегося с поверхности откачиваемого объёма, Q_2 - количество газа, проникающего в объём извне - через течи, Q_3 - количество газа, поступающего из насоса назад в систему. Количества газа Q_1 , Q_2 , Q_3 можно измерять в единицах PV с точностью до множителя RT . Основное уравнение, описывающее процесс откачки:

$$-VdP = (PW - Q_1 - Q_2 - Q_3)dt. \quad (1)$$

При достижении предельного вакуума с давлением $P_{\text{пр}}$ $\frac{dP}{dt} = 0$, поэтому уравнение (1) принимает вид

$$P_{\text{пр}}W = \sum_i Q_i. \quad (2)$$

Обычно Q_i слабо зависят от времени, поэтому их, как и W , можно считать постоянными. Интегрируя с учётом этого (1) и применяя (2), можно получить

$$P - P_{\text{пр}} = (P_0 - P_{\text{пр}})e^{-\frac{W}{V}t}, \quad (3)$$

где P_0 - начальное давление. Так как $P_{\text{пр}}$ велико по сравнению с P_0 , можно записать, что

$$P = P_0 e^{-\frac{W}{V}t}$$

Следует иметь в виду, что реальная вакуумная система состоит, помимо насоса, из множества других элементов, имеющих свою пропускные способности C_i . При этом полная скорость откачки W и собственная скорость откачки насоса W_H при этом связаны соотношением

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_H} + \sum_i C_i.$$

2.4 Течение газа через трубу

Характер течения газа существенно зависит от соотношения между размерами системы и длиной свободного пробега молекул. При нормальном атмосферном давлении и даже при достижении форвакуума длина свободного пробега молекул меньше диаметра трубок и течение откачиваемого газа определяется его вязкостью (взаимодействием молекул). При переходе к высокому вакууму соударения молекул между собой начинают играть меньшую роль, чем взаимодействие со стенками сосуда. Для течения газа через трубу кругового сечения в условиях высокого вакуума (в кнудсеновском режиме), справедлива формула

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

Пренебрегая давлением P_1 у конца, обращённого к насосу, получим выражение для пропускной способности трубы

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

3 Оборудование и экспериментальные погрешности

В работе использовались: вакуумная установка с высоковакуумным и форвакуумным баллонами, форвакуумным и диффузионным насосами, двумя термopарными, ионизационным и масляным манометрами и вариатором для регулирования тока, секундомер.

Инструментальные погрешности:

- **Масляный манометр:** $\Delta_{\text{мм}} = 0,5$ мм,
- **Секундомер:** $\Delta_{\text{с}} = 0,01$ с.

4 Результаты измерений и обработка экспериментальных данных

4.1 Измерение объёмов форвакуумной и высоковакуумной частей установки

Для измерения объёмов форвакуумной и высоковакуумной частей экспериментальной установки между кранами K_5 и K_6 был запёрт известный объём ($V_0 = 50$ см³) воздуха при нормальном атмосферном давлении ($P_{\text{атм}} = 1$ атм). Затем установка была откачана до форвакуума, после чего запёртый между кранами воздух был выпущен поочерёдно в форвакуумную и высоковакуумную части установки. Давление в установке было измерено с помощью масляного манометра: его можно определить по формуле

$$P = \rho_{\text{м}} g \Delta h, \quad (5)$$

где $\rho_{\text{м}} = 0,885 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ - плотность масла в манометре, Δh - разница высот между коленами манометра. Так как температура в установке поддерживается примерно постоянной, а давление форвакуума в установке пренебрежимо мало по сравнению с давлением запёртого газа, то, зная начальный объём и давление, можно из полученного значения давления определить объём частей установки, используя закон Бойля-Мариотта об изотермическом расширении газа:

$$T = \text{const} \iff PV = \text{const}. \quad (6)$$

Используя соотношения (5) и (6), для объёмов $V_{\text{фв}}$ форвакуумной и $V_{\text{вв}}$ высоковакуумной частей установки получаем

$$V_{\text{фв}} = \frac{P_{\text{атм}} V_0}{\rho_{\text{м}} g \Delta h_{\text{фв}}} - V_0,$$
$$V_{\text{вв}} = \frac{P_{\text{атм}} V_0}{\rho_{\text{м}} g \Delta h_{\text{вв}}} - V_0 - V_{\text{фв}}.$$

Измерения для данного опыта были проведены два раза. Полученные значения представлены в таблице 1. Как видно из результатов вычислений, значения различаются между собой из-за неточности данного метода. Для последующих измерений было взято среднее значение объёма высоковакуумной части установки:

- $V = 1223,3$ см³ $\approx 1,223$ л.

№ опыта	$h_1^{\text{ФВ}}, \text{ мм}$	$h_2^{\text{ФВ}}, \text{ мм}$	$\Delta h_{\text{ФВ}}, \text{ мм}$	$V_{\text{ФВ}}, \text{ см}^3$	$h_1^{\text{ВВ}}, \text{ мм}$	$h_2^{\text{ВВ}}, \text{ мм}$	$\Delta h_{\text{ВВ}}, \text{ мм}$	$V_{\text{ВВ}}, \text{ см}^3$
1	34,2	9,0	25,2	2310,7	30,0	14,0	16,0	1331,5
2	34,3	8,9	25,4	2292,4	31,0	13,9	17,1	1115,1

Таблица 1: Результаты измерения объёмов форвакуумной и высоковакуумной частей установки

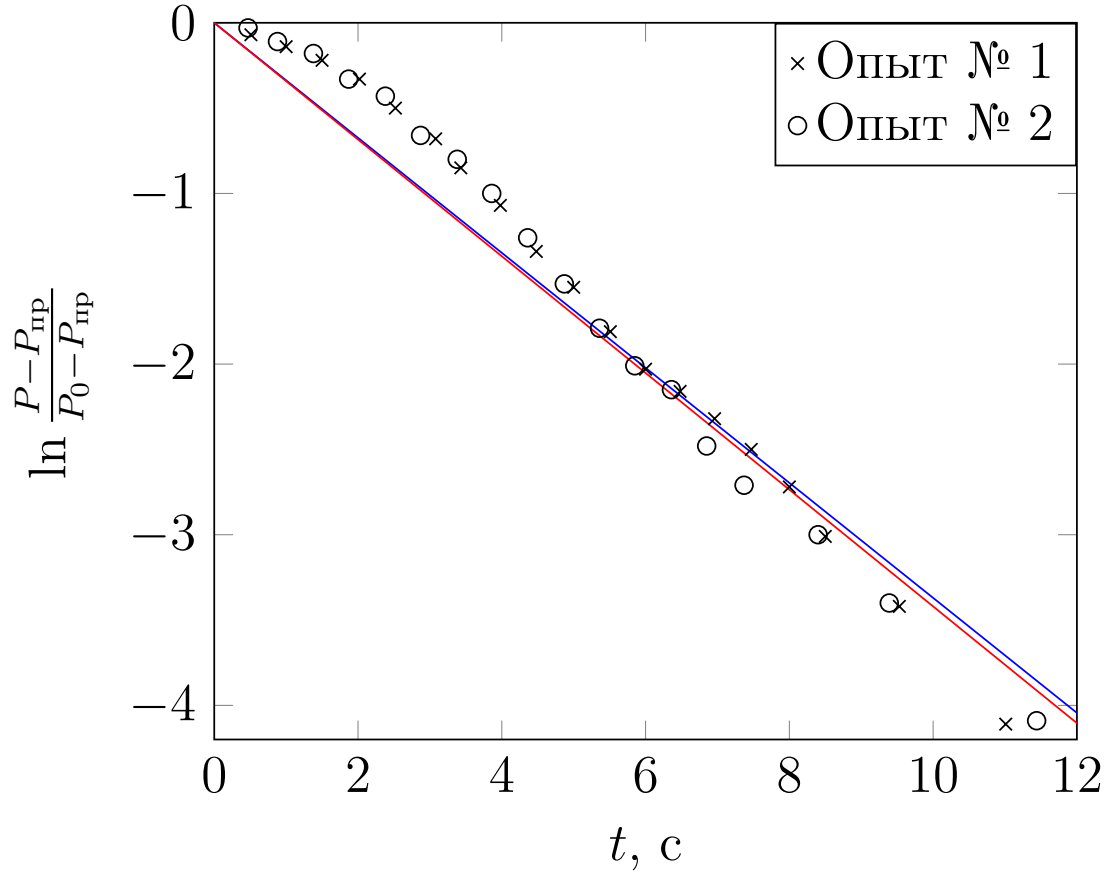


Рис. 7: Зависимость падения давления от времени при улучшении вакуума

5 Получение высокого вакуума и измерение скорости откачки

Во второй части экспериментальной работы в высоковакуумной части установки с помощью диффузионного насоса был получен вакуум с предельным давлением $P_{\text{пр}} = 1,0 \cdot 10^{-4}$ торр. Затем вакуум был ухудшен путём перекрытия крана, соединяющего насос и высоковакуумный баллон, а после снова улучшен. При этом получена зависимость давления в системе от времени при улучшении вакуума, изображенная на рис. 7.

Из (3) зависимость $\ln \frac{P - P_{\text{пр}}}{P_0 - P_{\text{пр}}}$ от времени линейна:

$$\ln \frac{P - P_{\text{пр}}}{P_0 - P_{\text{пр}}} = -\frac{W}{V}t,$$

где $V = V_{\text{ВВ}}$, $-\frac{W}{V}$ - коэффициент наклона прямой. С помощью метода наименьших квадратов найдены следующие значения данного коэффициента и соответствующие им величины скорости откачки системы:

- Опыт № 1: $-\frac{W}{V} = -0,337 \text{ с}^{-1}$, $W = 0,276 \text{ л/с}$;
- Опыт № 2: $-\frac{W}{V} = -0,342 \text{ с}^{-1}$, $W = 0,280 \text{ л/с}$.

Пользуясь полученными значениями, можно оценить сумму всех напеканий $\sum_i Q_i$ в систему:

$$\sum_i Q_i = P_{\text{пр}} W = 3,7 \text{ мДж/с.}$$

Скорость откачки также можно вычислить в стационарном режиме, зная предельное давление и установившееся давление при наличии искусственной щели. Для этого было измерено давление, установившееся после открытия капилляра между кранами K_5 и K_6 . Установившееся давление $P_{\text{уст}}$ и $P_{\text{пр}}$ связаны соотношениями

$$P_{\text{пр}} W = \sum_i Q_i, \quad P_{\text{уст}} W = \sum_i Q_i + \frac{d(PV)}{dt}$$

Подстановкой первого выражения во второе с использованием (4) получено общее уравнение

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

При открытии капилляра длины $L = 10,8$ см и радиуса $r = 0,4$ мм, соединяющего высоковакуумную и форвакуумную части установки, установилось давление $P_{\text{уст}} = 1,5 \cdot 10^{-4}$ торр. Из уравнения (7) получено следующее значение скорости откачки W :

- $W = 0,260$ л/с.

6 Обсуждение результатов и вывод

В данной работе были рассмотрены и проверены методы получения и измерения вакуума различной степени разрежения. Опыт показал, что для работы с различными по порядку величины значениями давления требуются приборы различной точности и что более точные приборы оказываются более чувствительными.

Погрешность полученных результатов, однако, остаётся значительной. Ошибка измерений особенно заметна в значениях объёмов, которые различаются почти на 10%. Данные неточности могли возникнуть из-за непостоянства температуры и неквазистатичности исследуемых процессов. Из-за большой ошибки косвенных измерений предпочтительнее использовать точные значения объёмов, указанные производителем установки. Неточности в измерении скорости откачки системы могли возникнуть из-за неучтённых значений пропускных способностей отверстий в системе, параметры которых не были указаны на установке. Также при определении линейного коэффициента в зависимости давления от времени было неучтено постепенное изменение пропускной способности крана при его постепенном отвинчивании.

Несмотря на погрешности измерений, исследованные в работе известные характерные свойства низкого и высокого вакуума подтвердились на практике, и способы его измерения оказались применимы. Для получения вакуума со степенью разрежения меньше $1,0 \cdot 10^{-4}$ следует использовать другие приборы и методы, например, комбинированную откачку.