

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Лабораторная работа 2.3.1

Получение и измерение вакуума

Выполнил:

Гисич Арсений

Б03-109

Долгопрудный

2022

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.

2 Теоретические сведения

В физике вакуумом называют состояние газа, при котором характерная длина свободного пробега молекул в газе λ сравнима по порядку величины с характерным линейным размером сосуда d , в котором газ находится. Для воздуха при нормальных условиях $\lambda \sim 10^{-5}$ см, откуда видно, что воздух в жилых помещениях не находится в состоянии вакуума, но, например, внутри пористых материалов, таких как древесина, уже может находиться.

В технике вакуумом называют состояние газа при котором его давление меньше атмосферного ($P < P_{атм}$). Различают следующие типы вакуума: *низкий*, когда средняя длина свободного пробега молекул газа значительно меньше характерного линейного размера рассматриваемого объёма, т.е. $\lambda < d$; *средний*, когда $\lambda \sim d$; *высокий* (или *глубокий*), когда $\lambda \gg d$ (рис. 1). Иногда выделяют ещё *сверхвысокий* вакуум, при котором не происходит заметного изменения свойств поверхности, первоначально свободной от адсорбированного газа, за время, существенное для проведения эксперимента. Газ в состоянии высокого вакуума называется *ультраразреженным*.

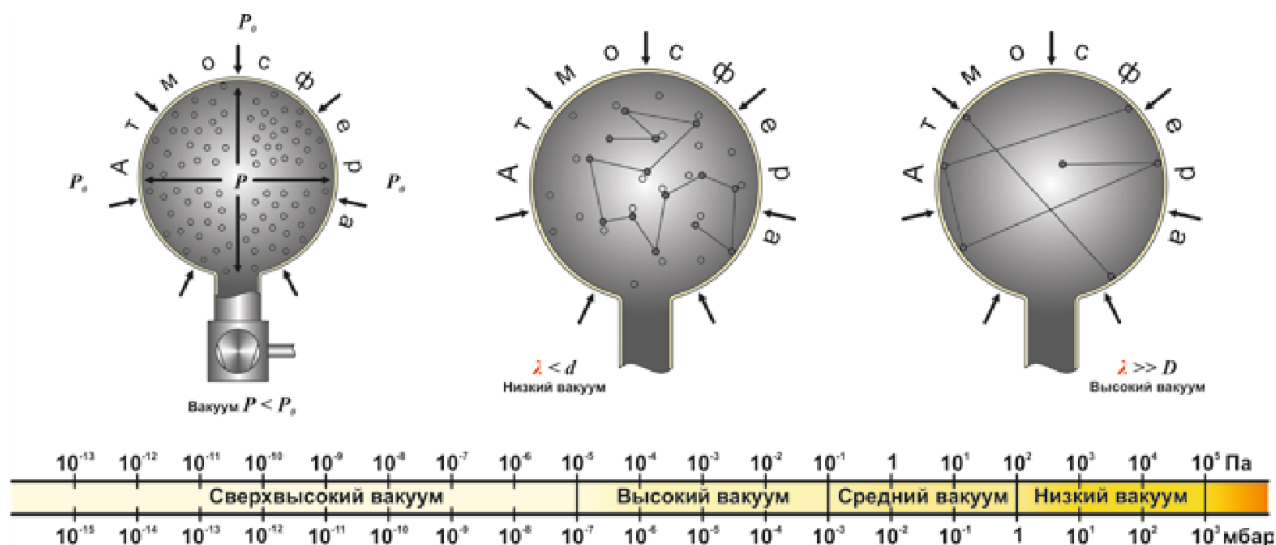


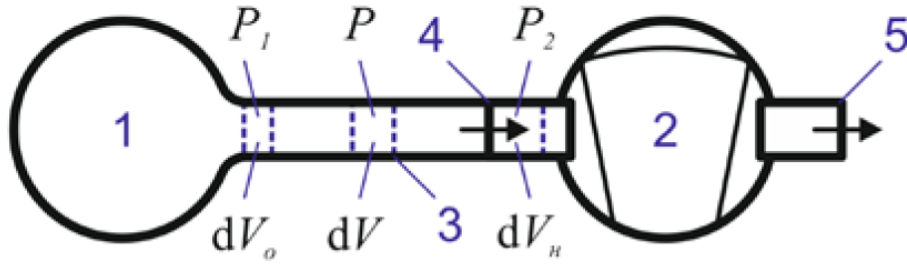
Рис. 1: Понятие о вакууме

2.1 Некоторые понятия для работы с вакуумной техникой

Основы процесса откачки и связанные с ним понятия рассмотрим на примере простейшей вакуумной системы (рис. 2).

Здесь и далее L - единица измерения длины, M - единица измерения массы, T - единица измерения времени.

1. **Предельное остаточное давление** (предельный вакуум) $P_{пр} [L^{-1}MT^{-2}]$ – наименьшее давление газа, которое формируется в процессе откачки в рассматриваемой системе.



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

Рис. 2: Простейшая вакуумная система

мом сечения вакуумпровода (рассматриваемой точке вакуумной системы). Обычно выделяют предельное давление в камере или на входе в насос.

2. **Наибольшее выпускное давление** $[L^{-1}MT^{-2}]$ - максимально допустимое давление газа на входе насоса.
3. **Быстрота откачивающего действия** (скорость откачки) вакуумной системы $S[L^3T^{-1}]$ – объём газа, проходящий через рассматриваемое сечение вакуумпровода в единицу времени при текущем давлении в данном сечении:

$$S = \frac{dV}{dT}.$$

Следовательно быстроедействие насоса S_n определяется как:

$$S_n = \frac{dV_n}{dt}.$$

А эффективная скорость откачки камеры S_0 :

$$S_0 = \frac{dV_0}{dt}.$$

4. Падение давления вдоль вакуумпровода $\Delta P = P_1 - P_2$ определяется его **пропускной способностью** (проводимостью) $U[L^3T^{-1}]$:

$$U = \frac{Q}{P_1 - P_2},$$

где $Q[L^2MT^{-3}]$ – **поток газа** через вакуумпровод с соответствующими давлениями на концах.

5. Величина $Z[L^{-3}T]$, обратная проводимости, называется **импедансом** вакуумпровода:

$$Z = \frac{1}{U}.$$

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:

$$P_1 S_0 = P S = P_2 S_{\text{н}} = Q.$$

6. Основное уравнение вакуумной техники

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{S_{\text{н}}} + \frac{1}{U}.$$

7. Количественной характеристикой течи, является **натекание** $Q_{\text{н}} [L^2 MT^{-3}]$, измеряемое при отключенных средствах откачки:

$$Q_{\text{н}} = \frac{P_{\kappa} - P_{\text{н}}}{\Delta t},$$

где V – замкнутый исследуемый объём; $P_{\text{н}}, P_{\kappa}$ – начальное и конечное давление в объеме; Δt – 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 $Q_{\text{н}}(t)$ носит, как правило, линейный характер.

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

$$Q_{\text{н}} \ll Q = P_1 S_0 = P_1 \frac{S_{\text{н}} U}{S_{\text{н}} + U}.$$

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:

$$Kn = \frac{\lambda}{d}.$$

Данная величина характеризует степень разреженности газового потока:

- 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.
- 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.
- 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.

2.2 Процесс откачки

Опишем процесс откачки математически: 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, приравнивая убыль газа из сосуда (с точностью до RT/μ) в единицу времени $-VdP$ и сумму перечисленных токов имеем:

$$-VdP = (PW - \sum_i Q_i)dt \quad (1)$$

При достижении предельного вакуума устанавливается давление $P_{\text{пр}}$, и $dP = 0$. Тогда

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

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 данной формуле, и это учтено в конструкции установки.

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_{\text{н}}} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots$$

2.3 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 высоком вакууме течение существеннее определяется взаимодействием со стенками

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

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

Если труба соединяет насос установку, то давлением P_1 у насоса можно пренебречь. Давление в сосуда $P = P_2$. Тогда имеем:

$$C_{\text{тр}} = \left(\frac{dV}{dt}\right)_{\text{тр}} = \frac{4r^3}{3l} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \quad (5)$$

Для пропускной способности отверстий имеется формула

$$C_{\text{отв}} = \left(\frac{dV}{dt}\right)_{\text{отв}} = S \frac{\bar{v}}{4}$$

Для воздуха при комнатной температуре $\bar{v}/4 = 110 \text{ м/с} = 11 \text{ л/с} \cdot \text{см}^2$.

3 Методика измерений

В данной работе используются традиционные методы откачки механическим форвакуумным насосом до давления 10^{-2} торр и диффузионным масляным насосом до давления 10^{-4} торр.

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: вариатор (автотрансформатор с регулируемым выходным напряжением), или реостат и амперметр для регулирования тока нагревателя диффузионного насоса.

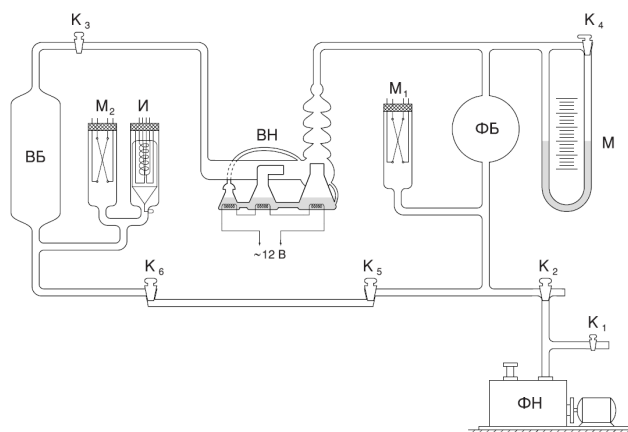


Рис. 3: Схема установки

Все краны вакуумной установки стеклянные. Стенки кранов тонкие, пробки кранов полые и составляют одно целое с рукоятками. Пробки кранов притерты к корпусам. Для герметизации используется вакуумная смазка.

Устройство и принцип действия *форвакуумного насоса* схематически, но довольно ясно изображены на рис 2. В положениях «а» и «б» пластина «А» засасывает разреженный воздух из откачиваемого объёма, а пластина «Б» вытесняет ранее захваченный воздух в атмосферу. В положениях «в» и «г» пластины поменялись ролями.

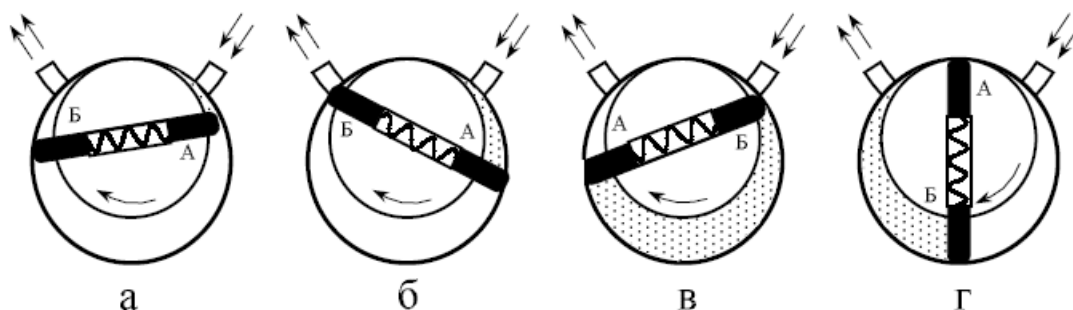


Рис. 4: Схема действия ротационного двухпластинчатого форвакуумного насоса

Устройство и принцип действия *диффузионного насоса* схематически изображены на рис 2. Такой насос работает в тысячи раз быстрее форвакуумного. Его действие основано на диффузии. Масло, налитое в сосуд А, подогревается электрической печкой. Пары

масла поднимаются по трубке Б и вырываются из сопла В. Струя паров увлекает молекулы газа, которые поступают из откачиваемого сосуда через трубку ВВ. В трубке Г мало осаждается и стекает вниз. Оставшийся газ, выходя в трубку ФВ, откачивается форвакуумным насосом.

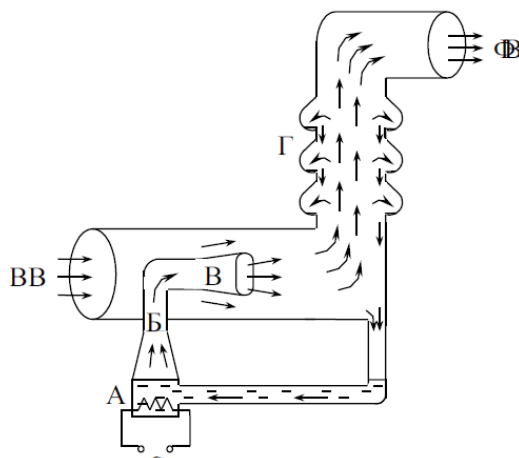


Рис. 5: Схема работы диффузионного насоса

Диффузионный насос работает наиболее эффективно, когда длина свободного пробега молекул примерно равна ширине кольцевого зазора между соплом В и стенками трубки ВВ. Давление насыщенных паров масла при рабочей температуре, создаваемой обогревателем сосуда А, много больше $5 \cdot 10^{-2}$ торр, поэтому пары масла создают плотную струю, увлекающую с собой молекулы газа.

Диффузионный насос, используемый в нашей установке (см. рис 1) имеет две ступени и соответственно два сопла. Одно сопло вертикальное (первая ступень), второе горизонтальное (вторая ступень). За второй ступенью имеется ещё одна печь, но пар из этой печи поступает не в сопло, а по тонкой трубке подводится ближе к печке первой ступени. Эта печь осуществляет фракционирование масла. Легколетучие фракции масла, испаряясь, поступают в первую ступень, обогащая её. По этой причине плотность струи первой ступени выше, и эта ступень начинает откачивать при более высоком давлении в форвакуумной части. Вторая ступень обогащается малолетучими фракциями масла. Плотность струи второй ступени меньше, но меньше и давление насыщенных паров. Соответственно, в откачиваемый объем поступает меньше паров масла, и его удаётся откачать до более высокого вакуума.

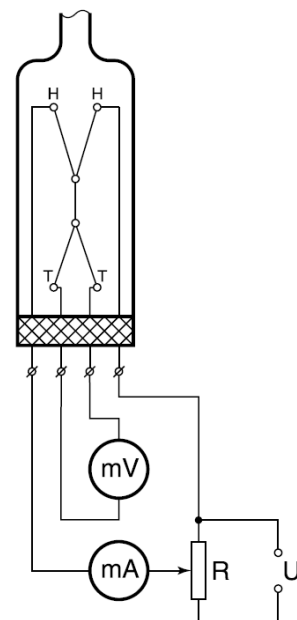


Рис. 6: Схема терморпарного манометра с лампой ЛТ-2

Терморпарный манометр. Чувствительным элементом манометра является платиново-родиевая терморпара, спаянная с никелевой нитью накала и заключённая в стеклянный баллон. Устройство терморпары пояснено на рис. 4. По нити накала НН пропускается ток постоянной величины. Для установки тока служит потенциометр R, расположенный на передней панели вакуумметра. Терморпара

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, не меньших 1 торр, теплопроводность газа, а вместе с ней и ЭДС термопары практически не зависят от давления газа, и прибор не работает.

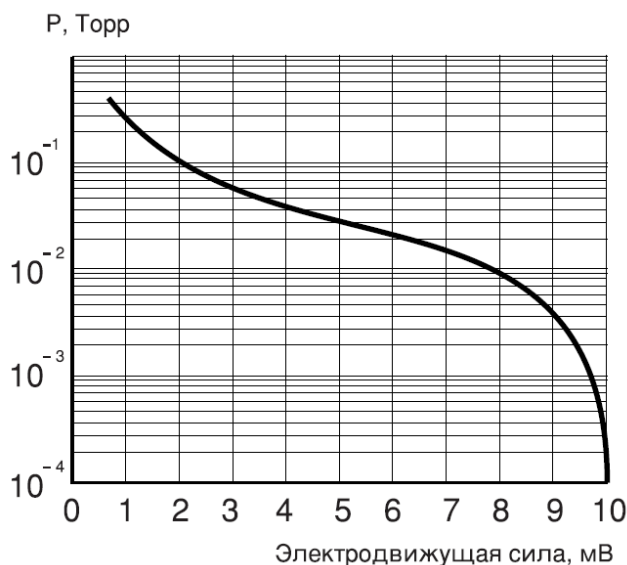


Рис. 7: Градуировочная кривая термопары ЛТ-2

При улучшении вакуума средний свободный пробег молекул становится сравнимым с диаметром нити, теплоотвод падает, и температура спая возрастает. При вакууме порядка 10^{-3} торр теплоотвод, осуществляемый газом, становится сравнимым с другими потерями тепла, и температура становится практически постоянной. Градуировочная кривая термопары приведена на рис. 5.

Ионизационный манометр. Схема ионизационного манометра изображена на рисунке 6. Он представляет собой трехэлектродную лампу. Электроны испускаются раскалённым катодом и увлекаются электрическим полем к аноду, имеющему вид редкой спирали. Проскакивая за её витки, электроны замедляются полем коллектора и возвращаются к аноду. Прежде чем осесть на аноде, они успевают много раз пересечь пространство между катодом и коллектором. На своём пути электроны ионизуют молекулы газа. Ионы, образовавшиеся между анодом и коллектором, притягиваются полем коллектора и определяют его ток.



Рис. 8: Схема ионизационной лампы ЛТ-2

Накалённый катод ионизационного манометра перегорает, если давление в системе пре-

вышает 10^{-3} торр, поэтому перед его включением необходимо проверить давление термодинамическим манометром.

4 Используемое оборудование

1. Вакуумная установка с манометрами: масляными, термодинамическими и ионизационными, $\delta_{\text{масл.маном.}} = 0,05 \text{ см}$;

5 Результаты измерений и обработка данных

Начальные условия и параметры установки:

$$P_{\text{атм}} = 101,1 \pm 0,05 \text{ кПа}$$

$$V_{K5+K6+кан} = 50 \text{ см}^3$$

$$L = 10,8 \text{ см}$$

$$d_{\text{кан}} = 0,8 \text{ мм}$$

$$\rho_{\text{масла}} = 0,885 \text{ г/см}^3$$

5.1 Определение объёма форвакуумной и высоковакуумной частей установки

Показания масляного манометра, когда воздух «заперт» в форвакуумной части установки:

$$h_1 = 34,5 \text{ см}$$

$$h_2 = 9 \text{ см}$$

$$\Delta h_{\text{фв}} = 25,5 \text{ см}$$

Тогда

$$P_{\text{фв}} = \rho g \Delta h_{\text{фв}} = 2211,6 \pm 4,3 \text{ Па}.$$

По закону Бойля-Мариотта

$$P_{\text{фв}} V_{\text{фв}} = P_{\text{атм}} V_{\text{кан}} \Rightarrow V_{\text{фв}} = \frac{P_{\text{атм}} V_{\text{кан}}}{P_{\text{фв}}}.$$

Погрешность определяется по формуле

$$\delta_{V_{\text{фв}}} = \sqrt{\left(\frac{\delta P_{\text{атм.м}}}{P_{\text{атм.м}}}\right)^2 + \left(\frac{\delta P_{\text{фв}}}{P_{\text{фв}}}\right)^2} \cdot V_{\text{фв}}.$$

Полученное значение $V_{\text{фв}} = 2,286 \pm 0,005 \text{ л}$.

Показания масляного манометра, когда воздух распространился по всему объёму установки:

$$h_3 = 30,4 \text{ см}$$

$$h_4 = 14,1 \text{ см}$$

$$\Delta h_{\text{полн}} = 16,3 \text{ см}$$

Тогда

$$P_{полн} = 1413,7 \pm 4,3 \text{ Па}.$$

Полученное значение $V_{полн} = 3,576 \pm 0,011 \text{ л}$. Следовательно, $V_{\phi\phi} = V_{полн} - V_{\phi\phi} = 1,290 \pm 0,012 \text{ л}$.

5.2 Получение высокого вакуума и измерение скорости откачки

Предельное давление, достигнутое при откачке $P_{np} = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ мм.рт.ст.}$. Найдём скорость откачки. Прологарифмируем формулу (3), чтобы получить на графике прямую линию. График зависимости представлен на рис. 9.

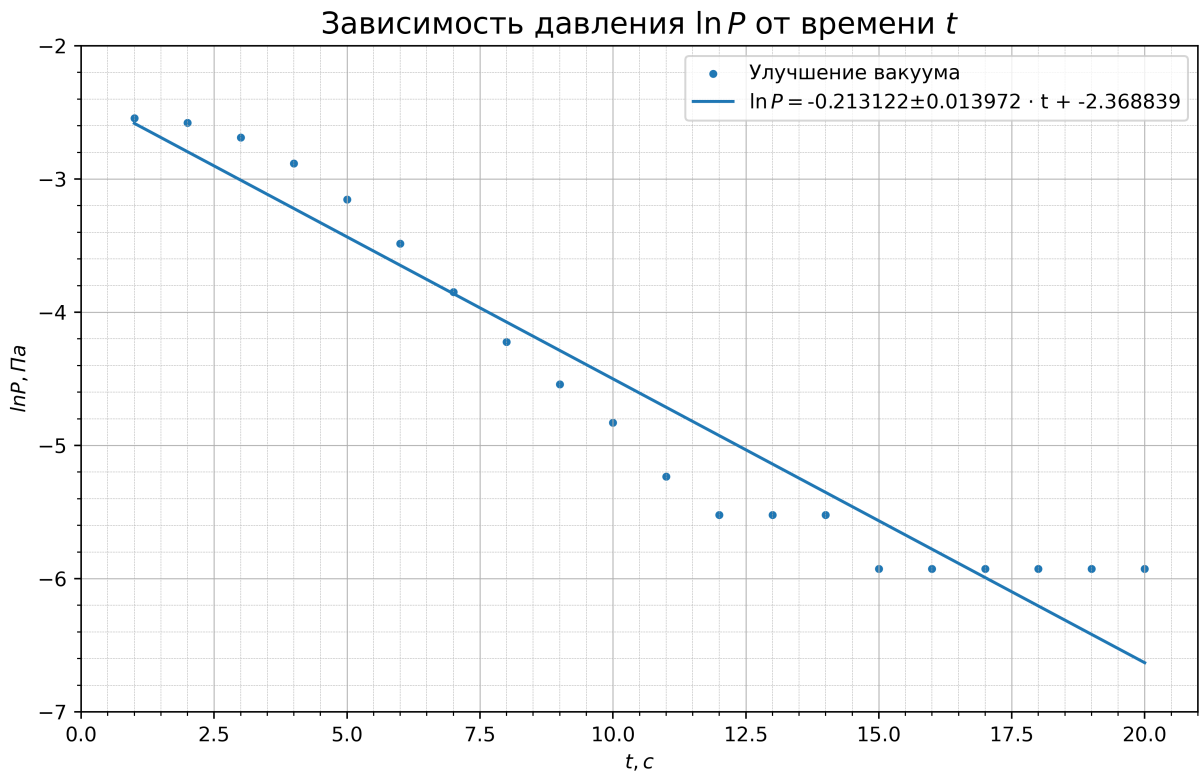


Рис. 9:

Скорость откачки определяется по формуле

$$W = -k \cdot V_{\phi\phi},$$

где k — коэффициент наклона прямой.

Погрешность определяется по формуле

$$\delta_W = \sqrt{\left(\frac{\delta_k}{k}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{V_{\phi\phi}}}{V_{\phi\phi}}\right)^2} \cdot W.$$

Полученное значение:

$$W = 0,258 \pm 0,012 \text{ л/с}.$$

График зависимости P от t при ухудшении вакуума представлен на рис. 10.

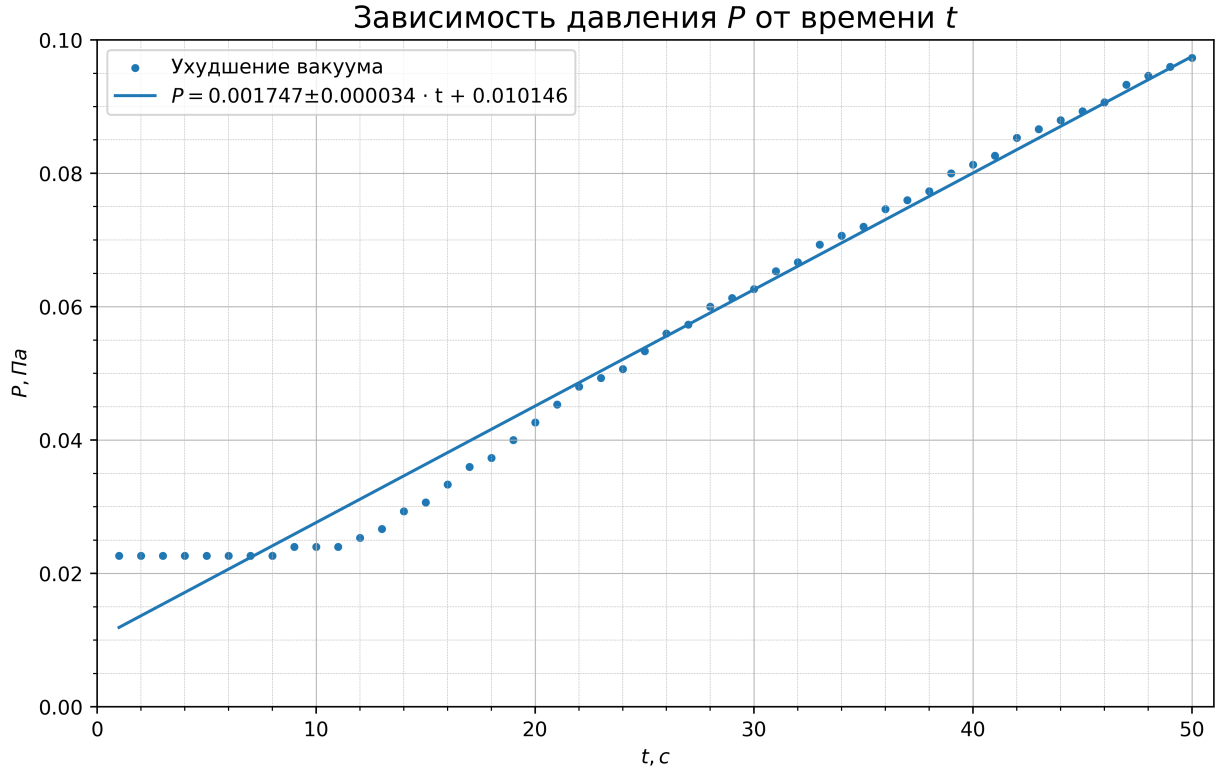


Рис. 10:

Используя соотношение (1), которое примет вид

$$V_{\text{бб}} dP = (Q_{\partial} + Q_n) dt,$$

оценим Q_n . Считаем

$$\frac{dP}{dt} = k,$$

где k — коэффициент наклона прямой при ухудшении вакуума. Погрешность определяется по формуле

$$\delta_{(Q_{\partial}+Q_n)} = \sqrt{\left(\frac{\delta_k}{k}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{V_{\text{бб}}}}{V_{\text{бб}}}\right)^2} \cdot V_{\text{бб}} k.$$

Получаем:

$$Q_n + Q_{\partial} \approx 23,2 \pm 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{л}/\text{с}.$$

Так как $Q_{\partial} \ll Q_n$, можно считать $Q_{\partial} + Q_n \approx Q_n$. Таким образом,

$$Q_n \approx 23,2 \pm 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{л}/\text{с}.$$

Оценим пропускную способность трубы от вакуумного баллона, имея в виду порядки её диаметра и длины и размерного множителя

$$d \sim 10^{-2} \text{ м}, \quad L \sim 1 \text{ м}, \quad \sqrt{\frac{RT}{\mu}} \sim 500 \text{ м}/\text{с},$$

используя формулу (5) имеем:

$$C_{\text{тр}} \sim 1 \text{ л/с},$$

что отлично согласуется с полученным ранее значением W .

Расчитаем производительность насоса по различию $P_{\text{уст}}$ и $P_{\text{пр}}$.

$$P_{\text{уст}} = 2,2 \cdot 10^{-4} \text{ мм.рт.ст.}, \quad P_{\text{фв}} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ мм.рт.ст.}$$

Запишем (2) для данного случая:

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

С учётом (5) получаем

$$(P_{\text{уст}} - P_{\text{пр}})W = \frac{4}{3}(d/2)^3 \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \frac{P_{\text{фв}}}{L},$$

где d и L — диаметр и длина капилляра. Получаем:

$$W = 0,141 \pm 0,018 \text{ л/с}.$$

Результат отличается почти ровно в два раза от полученного ранее. Вероятно, потому что теперь течение газа определяется пропускной способностью двух труб, соединённых последовательно (4). Судя по всему, проводимости трубки от ВВ баллона и капилляра сравнимы.

6 Обсуждение результатов и выводы

В данной работе исследовалась зависимость давления в установке от времени. По результатам измерения давления различными способами определялась производительность вакуумного насоса. Полученное значение для скорости откачки:

$$W = 0,258 \pm 0,012 \text{ л/с}.$$

Использованный в работе метод измерений позволяет достичь относительной точности результатов в 5%. Метод расчёта скорости откачки по зависимости давления от времени при улучшении вакуума оказался точнее в сравнении с методом расчёта по различию $P_{\text{уст}}$ и $P_{\text{пр}}$. Основной вклад в погрешность вносит погрешность определения коэффициентов линейной аппроксимации. Также в данной работе были проверены теоретические зависимости, связанные с течением газа (рис. 9 и 10).