



Отчет о лабораторной работе по теме: "Основы вакуумной техники"

Линкин Вячеслав Алексеевич, Факультет Физики

28 декабря 2024 г.

Содержание

Введение	1
Теория	2
Практическая часть	3
Подготовка установки и сбор данных	3
Перенос данных из видеоформата	3
Измерение предельного вакуума	4
Две вакуумные камеры	5
Заключение	6
Список литературы	6

Введение

Задачи работы:

- Собрать установку и снять данные;
- Измерить предельное давление и скорость откачки;
- Сравнить быстроту откачки двух камер;
- Оценить производительность турбомолекулярного насоса.

Оборудование: вакуумная камера с фланцами ISO-K-100 – 2шт., заглушки ISO-K-100 к вакуумным камерам — 3шт., вентили с фланцами ISOKF-16 – 3 шт., манометрические преобразователи ПМТ-2, ПМИ-2 с переходниками ISO-KF-25, цифровые датчики вакуума Thygason, цифровой вакуумметр Мерадат-ВИТ, турбомолекулярный откачный пост, комплект вакуумной арматуры.

Теория

Рассмотрим вакуумную систему, состоящую из камеры объема V , соединенной с линией откачки и насосом. Пусть в начальный момент камера содержит газ при давлении p_0 . Для описания потока газа через линию откачки вводится понятие пропускной способности C , которая связана с разницей давлений Δp на концах линии и потоком газа Q_{pv} следующим соотношением:

$$C = \frac{Q_{pv}}{\Delta p} \quad (1)$$

При различных условиях, течение газа принято делить на три режима:

- **Вязкий поток**, где длина свободного пробега молекулы λ намного меньше диаметра линии d , $\lambda \ll d/100$.
- **Переходный поток**, где $d/100 < \lambda < d/2$.
- **Молекулярный поток**, где $\lambda \gg d/2$.

В реальных системах линия откачки состоит из нескольких последовательных элементов с пропускными способностями C_1, C_2, \dots, C_n , и общая пропускная способность вычисляется как:

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \quad (2)$$

Насос характеризуется скоростью откачки S , показывающей объем газа, удаляемого за единицу времени:

$$S = -\frac{dV}{dt} \quad (3)$$

При этом поток газа из камеры в насос при постоянной температуре описывается уравнением:

$$Q = -\frac{d(pV)}{dt} \Rightarrow p = p_0 e^{-t/\tau}, \quad \tau = \frac{V}{S} \quad (4)$$

Эти выражения справедливы для идеализированной системы, но на практике давление p_2 на выходе линии откачки и давление p_1 на входе насоса различаются. Поэтому вводится понятие эффективной скорости откачки S_{eff} , которая связывается с параметрами линии C и насоса S :

$$\frac{1}{S_{\text{eff}}} = \frac{1}{S} + \frac{1}{C} \quad (5)$$

В результате давление в камере экспоненциально убывает с течением времени:

$$p_2(t) = p_0 e^{-t/\tau}, \quad \tau = \frac{V}{S_{\text{eff}}} \quad (6)$$

Также для оценки производительности турбомолекулярного насоса (далее для краткости ТМН) нам пригодится выражение для быстроты откачки в зависимости от времени и давления. Из (6) получаем:

$$S_{\text{eff}} = \frac{V}{t} \ln \left(\frac{p_0}{p} \right) \quad (7)$$

Одна из камер подключена к насосу напрямую, поэтому для нее $S_{\text{eff}} = S$. По ней и будет осуществляться оценка. Также нам понадобится проводимость линии в молекулярном режиме:

$$C = \frac{3,81d^3}{l} \sqrt{\frac{T}{m_0}}, \quad (8)$$

где d - диаметр линии в см, l - длина линии в см, T - температура в К и m_0 - молярная масса газа в г/моль.

Практическая часть

Подготовка установки и сбор данных

Ниже изображена схема установки, используемой на протяжении всей работы:

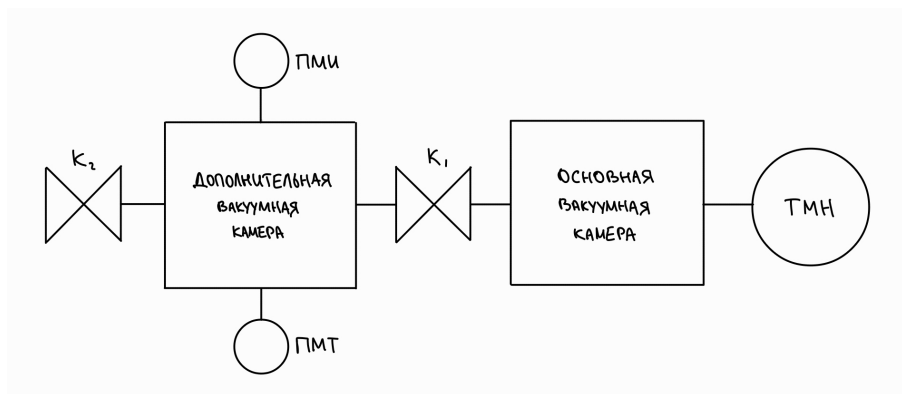


Рис. 1: Схема установки. K_1 и K_2 - клапаны, ПМИ и ПМТ - ионизационный и термопарный тачики давления соответственно

Помимо клапана K_1 обе камеры связаны через тонкий капилляр. Работа состоит из двух частей, в первой из которых клапан K_1 перекрыт, то есть откачка ведется только из основной камеры.

Перенос данных из видеоформата

Во время работы показания датчиков ПМИ и ПМТ выводились на дисплей цифрового вакуумметра Мерадат-ВИТ. Напротив дисплея была зафиксирована камера, так что обработка данных включала в себя перенос данных из видеоформата в табличный. Из соображений получения полезного опыта, для этих целей было решено использовать машинное обучение.

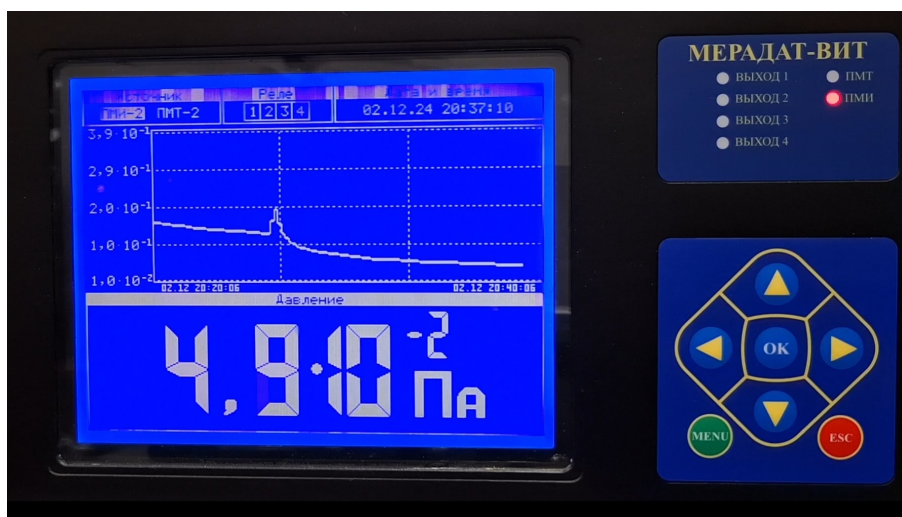


Рис. 2: Формат собранных данных, кадр из видео

Для чтения показаний с экрана была обучена однослойная модель логистической регрессии. Задачей модели было распознавание цифр на изображении. Таким образом, использование модели подразумевало предварительное разделение видео на несколько частей, где каждая содержит информацию лишь об одной цифре.

Кроме того, для лучшей работы модели изображение упрощалось. Для работы с изображениями использовалась библиотека для работы с компьютерным зрением OpenCV. Прежде всего, картинка из формата RGB приводилась к ахроматическому виду и инвертировалась. На языке OpenCV, каждое такое изображение - это массив, где каждому пикселю сопоставлено число от 1 (черный) до 255 (белый).

Пиксели, составляющие цифру, как правило, контрастируют с пикселями фона, хотя внутри каждой из двух групп они испытывают лишь небольшие флуктуации между собой - это и был шум, от которого надо было избавиться. Эффективным решением оказалось применить к каждому пикселю функцию Хэвисайда $\theta((x - x_0)/255)$, где x_0 - некоторая граничная интенсивность пикселя. Ниже продемонстрированы примеры готовых данных:

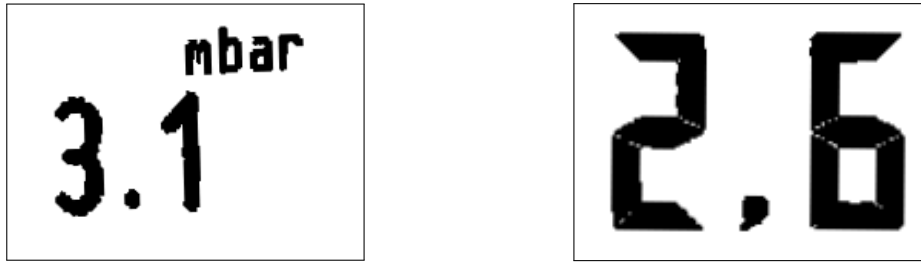


Рис. 3: Результат действия функции Хэвисайда

Для обучения и тестирования модели использовалась выборка из 400 примеров, собранных с видео на подобие тех, для которых обучалась модель. Для сбора примеров - или, как говорится, разметки данных - была написана небольшая программа: обучающее видео кадрится до одной цифры, которая меняется чаще всего (обычно, первая цифра после запятой); это видео преобразуется в массив кадров - изображений цифр; программа выводит на экран случайную цифру и учитель сообщает программе соответствующее значение; так программа заполняет таблицу соответствий цифра-изображение.

Перед загрузкой в модель изображение сжимается до разрешения 28×28 . Таким образом, на вход модели поступает 28^2 признаков. Модель имеет один внутренний слой нейронов. Выход модели состоит из десяти значений - это предсказанные моделью вероятности того, что изображение содержит ту или иную цифру. Результатов работы модели является цифра с наибольшей предсказанной вероятностью. При обучении модели использовалась MSE функция ошибок, а в качестве оптимизатора выступил Adam.

При тестировании модели использовалась метрика *accuracy*, равная доле правильных предсказаний модели. Ее значение на тестовой выборке составило 100%.

Измерение предельного вакуума

За ~ 40 минут непрерывной откачки удалось достичь давления $p = 210 \pm 5$ мкПа, что соответствует высокому вакууму. Вид зависимости $p(t)$ приведен далее:

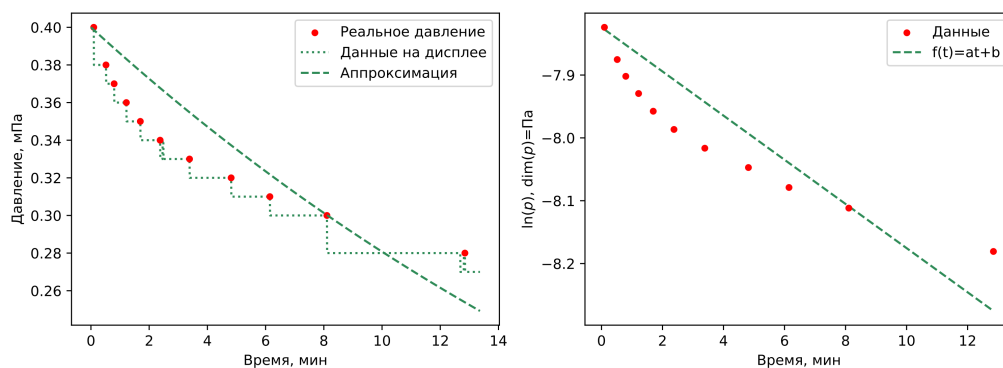


Рис. 4: График первого эксперимента. Аппроксимация $p(t)$

К сожалению, данные о давлении в начале откачки были утрачены, поэтому судить приходится только по значениям близким к предельному вакууму. На графике слева зелеными точками показаны данные, выводимые на дисплее. Как видно, они имеют ступенчатый вид, т.к. на дисплей данные выводились с точностью до одной цифры после запятой. Красным выделены точки, с наименьшей погрешностью измерения.

Аппроксимация линеаризованных значений (см. правый график) дала величину коэффициента наклона $a = 0,59 \pm 0,06$ 1/мс. Сравнивая с (6) получаем среднюю быстроту откачки

$S = 25 \pm 4$ мл/мин. При вычислении использовался объем вакуумной камеры $V = 0,7 \pm 0,1$ л, основанный на предположении, что внутренний объем цилиндра близок к внешнему.

Далее продемонстрирована эффективность ТМН, основанная на (7):

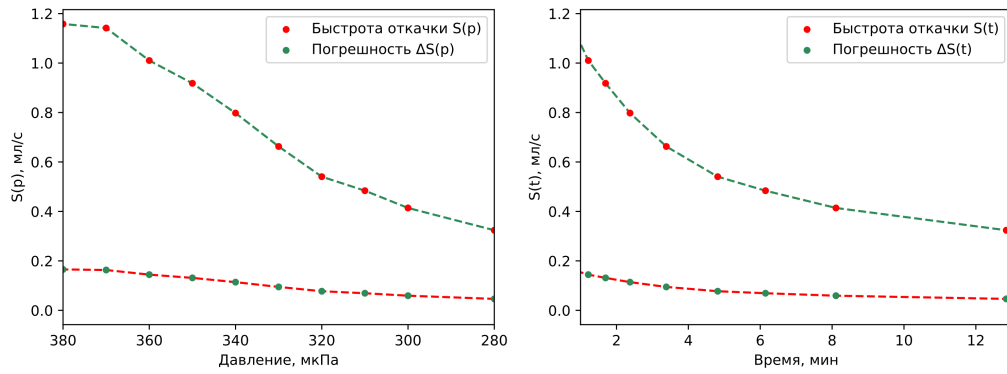


Рис. 5: Быстрота откачки в зависимости от давления и от времени

Две вакуумные камеры

Далее для наблюдения откачки воздуха из камеры, соединенной с основной при помощи тонкого капилляра был открыт клапан K_1 . Ниже приведены графики давления в основной и дополнительной камерах соответственно:

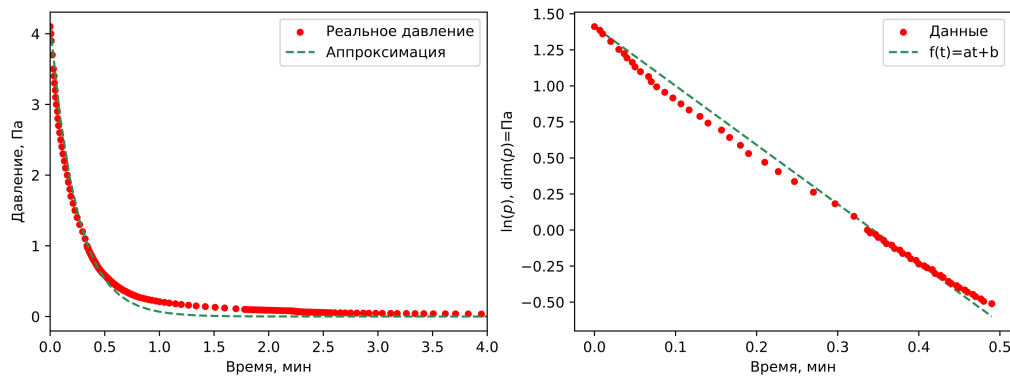


Рис. 6: Давление в основной камере, $a = 68,4 \pm 0,4$ 1/мс

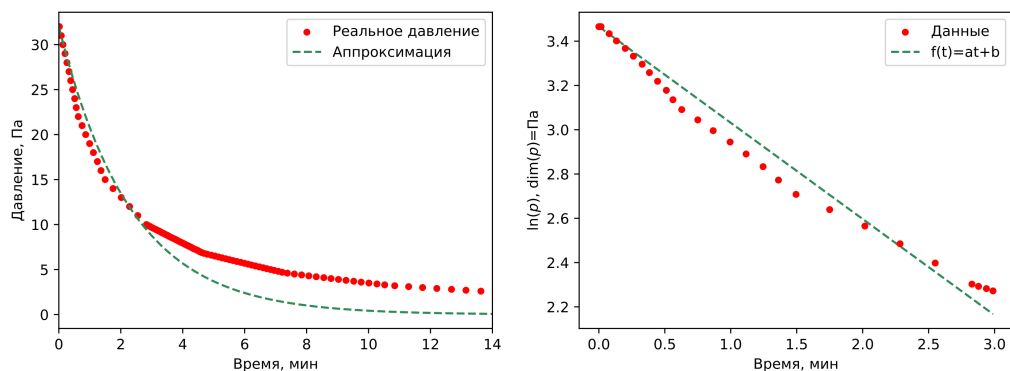


Рис. 7: Давление в дополнительной камере, $a = 7,2 \pm 0,1$ 1/мс

Аппроксимация проводилась по точкам, соответствующим промежутку времени, за который давление упало в e раз, на этом участке эволюция давления наиболее близка к модельной. Аналогично предыдущему пункту, средние величины эффективной быстроты откачки для основной камеры $S_1 = 2,9 \pm 0,4$ л/мин, для дополнительной - $S_2 = 0,30 \pm 0,04$ л/мин. Как и ожидалось, воздух из дополнительной камеры откачивается в разы медленнее.

$S_1 \approx S$, согласно основному уравнению вакуумной техники (5), поскольку основная камера подключена к насосу непосредственно. Следовательно, $S_2 = (1/S_1 + 1/C)^{-1}$. Вычислим проводимость капилляра в предположении, что режим тока воздуха молекулярный. Характеристики капилляра: $d = 2,0 \pm 0,5$ мм, $l = 25 \pm 5$ см. По (8) получаем $C = 0,23 \pm 0,18$ л/мин. Тогда, согласно (5), $S_2 = 0,22 \pm 0,17$ л/мин. В следствие низкой точности измерения диаметра капилляра, погрешность составила 79%. Тем не менее, результат вполне соотносится с ранее полученным значением $S_2 = 0,30 \pm 0,04$ л/мин.

Аналогично предыдущему пункту, пользуясь (7), находим зависимость мгновенной эффективной быстроты откачки для основной камеры:

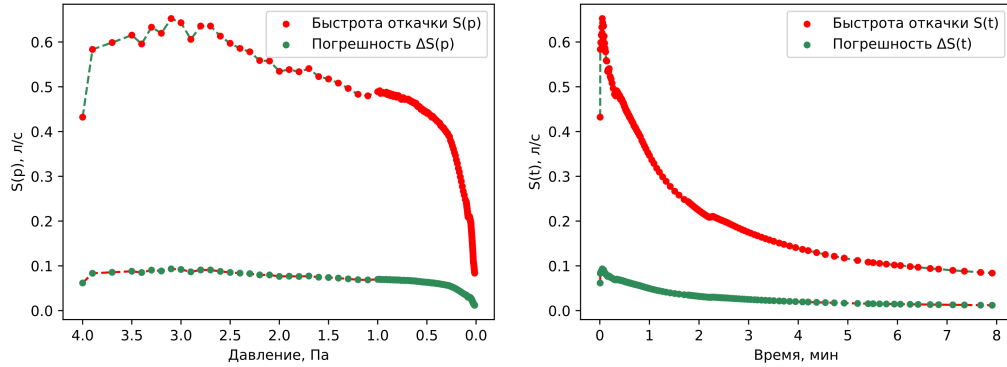


Рис. 8: Быстрота откачки S_1 в зависимости от давления и от времени

Как уже было показано, $S_1 \approx S$. Таким образом, Рис. 8 отражает производительность ТМН.

Заключение

В ходе данной лабораторной работы, была собрана установка для исследования вакуума (см. Рис. 1). Затем последовательно были проведены два эксперимента: с одной и с двумя камерами соответственно.

Показания датчиков давления ПМИ и ПМТ снимались с дисплея вакуумметра Мерадат-ВИТ на камеру. Перенос данных из видео в таблицу осуществлялся методами машинного обучения. Специально для этого была обучена модель логистической регрессии.

В первом опыте за ~ 40 минут непрерывной откачки было достигнуто предельное давление $p = 210 \pm 5$ мкПа, что соответствует высокому вакууму. При давлении $p = 0.4$ мПа в начале измерений средняя быстрота откачки составила $S = 25 \pm 4$ мл/мин.

В следующем опыте через тонкий капилляр к основной камере, соединенной с ТМН, была дополнительно присоединена такая же. Средняя быстрота откачки в основной и дополнительной камерах составила $S_1 = 2,9 \pm 0,4$ л/мин и $S_2 = 0,30 \pm 0,04$ л/мин соответственно. Как и ожидалось, откачка из дополнительной камеры оказалась на порядок медленнее.

Далее была проведена перекрестная проверка результатов: из геометрических размеров капилляра и предположения о том, что режим тока воздуха молекулярный, была получена проводимость капилляра $C = 0,23 \pm 0,18$ л/мин; затем, пользуясь тем, что $S_1 \approx S$, из основного уравнения вакуумной техники было получено $S_2 = 0,22 \pm 0,17$ л/мин. Несмотря на большую погрешность, результат оказался согласован с полученным ранее значением.

В конце концов был получен график производительности ТМН. Результат продемонстрирован на Рис. 8.

Список литературы

«Методическое пособие к лабораторной работе "Основы вакуумной техники"»: НИУ ВШЭ, Факультет Физики, 2024 г.