

Откачка воздуха в замкнутом объёме

Лабораторная работа

Высшая школа экономики, Санкт-Петербургская школа
физико-математических и компьютерных наук

Физика, 2 курс

Андрей Ситников

Никита Афанасьев

15.12.2022

Введение

В этой работе мы следили за поведением воздуха в системе при его откачке с помощью насоса. Как и в прошлой работе, мы имели минимум оборудования для отслеживания параметров системы. Для этого мы использовали цифровой измеритель давления без возможности подключения к компьютеру и телефонную камеру. В результате мы собрали несколько принципиально различных схем и провели несколько измерений с различным положением барометра. В процессе работы был создан скрипт, распознающий показания датчика с видео.

Цель работы

Узнать больше о поведении воздуха и работе насоса при откачке и низком давлении.

Установка

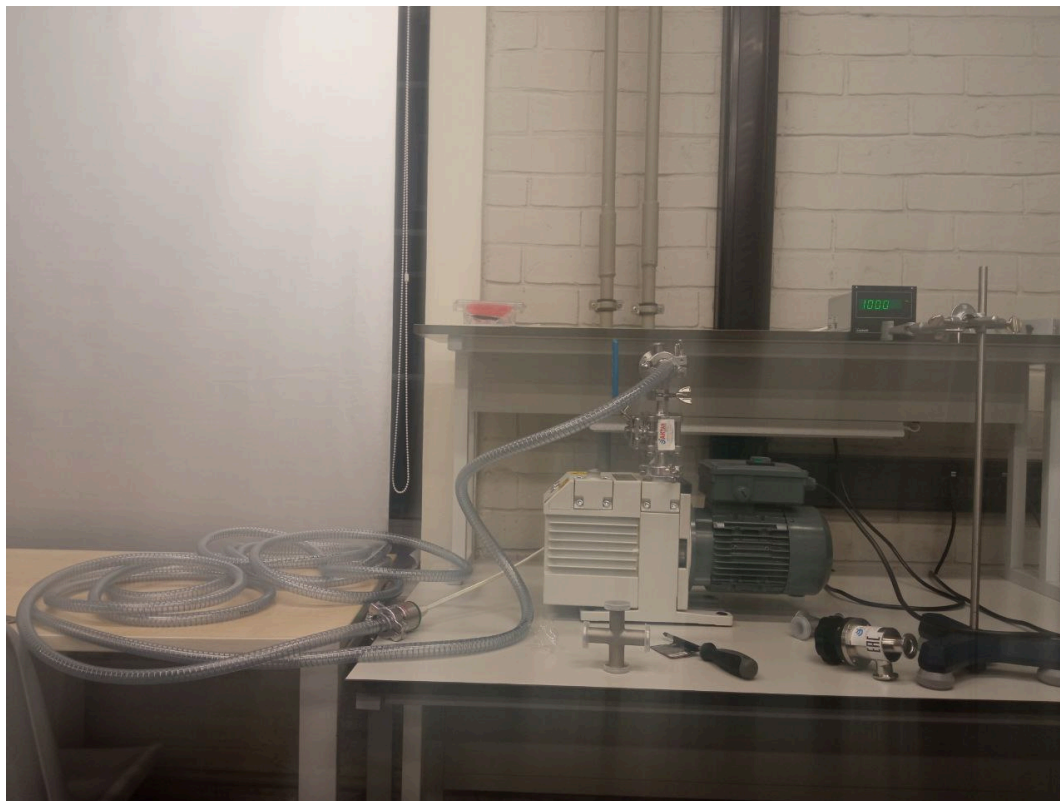


Рисунок 1: Фото установки

В этой работе мы пользовались системой собранной из вакуумного насоса, измерителя давления, труб, клапанов, и шланга (длина — 10.2 метра, радиус — 1.22 см). В процессе измерения мы записывали видео, на котором были видны показания датчика. Обработка измерений производилась с помощью специальной программы, определявшей показания прибора с видео в каждый момент времени.

Обозначения

На этой схеме введём общеупотребительные обозначения, которые будем использовать на дальнейших схемах:

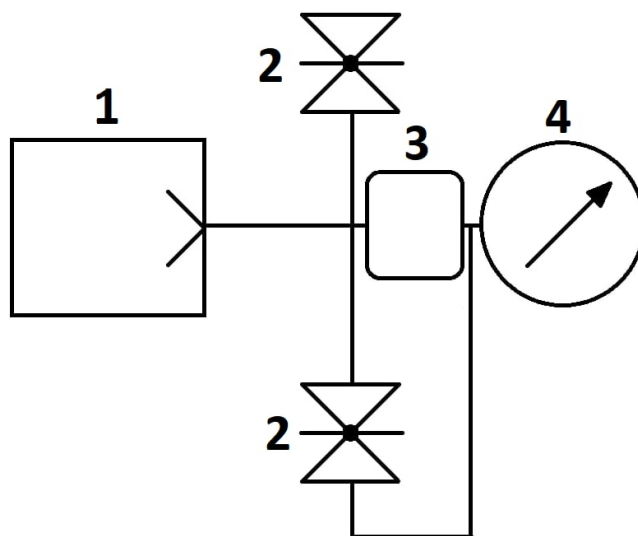


Рисунок 2: схема установки

- 1) Вакуумный насос
- 2) Задвижка
- 3) Шланг (обозначаем как резервуар)
- 4) Вакуумметр (измеритель давления)

Черные соединительные линии обозначают наличие плотного соединения между объектами.

Методика

В работе мы провели несколько серий экспериментов.

В самом начале мы использовали пластмассовые “крышки” для того, чтобы закрывать отверстия в соединительных элементах. Однако в первые несколько измерений оказалось, что давление понижается максимум до 1 mbar, и очень быстро происходит разгерметизация.

Мы пересобрали систему, перезакрутили все соединители, давление стало падать до немного меньших значений, но по-прежнему достаточно быстро.

Наконец, мы подключили измеритель давления напрямую к насосу, максимально уменьшив количество возможных протечек и объём системы. Давление упало вплоть до 10^{-3} mbar. Тем самым мы выяснили примерную цель, на которую мы должны выходить по давлению после большого промежутка времени.

После этого эксперимента мы пересобрали систему так, чтобы не использовать пластиковые крышки для закрытия отверстий. Это действительно помогло, давление стало падать до $10^{-1} - 10^{-2}$ mbar, протечки сильно замедлились.

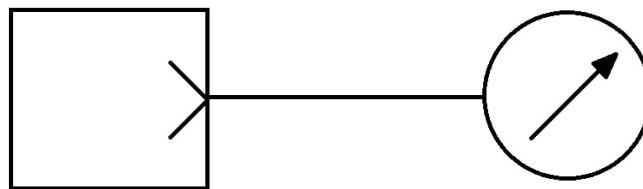


Рисунок 3: Схема установки №1

Затем мы провели эксперимент с увеличенным давлением, подключив секцию трубы и клапан в систему, для более простого впуска воздуха назад в систему, после завершения измерения.

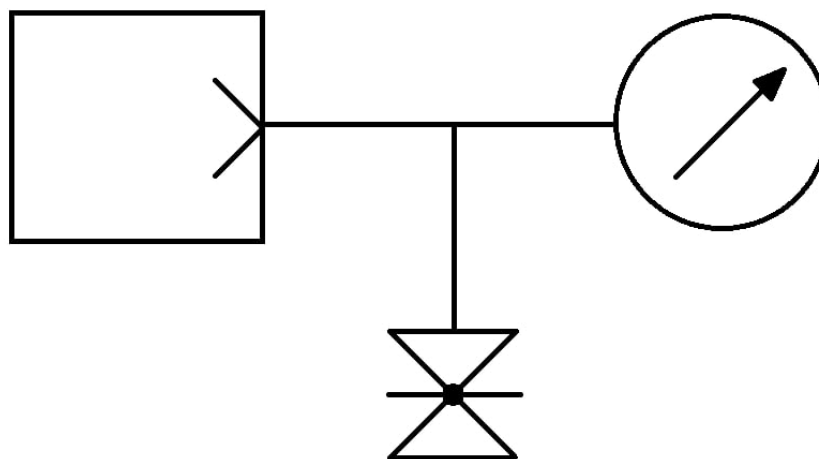


Рисунок 4: Схема установки №2

После проведения этих базовых экспериментов мы отдались воображению, и начали придумывать более интересные схемы. Следующим шагом было подключение в систему длинного шланга:

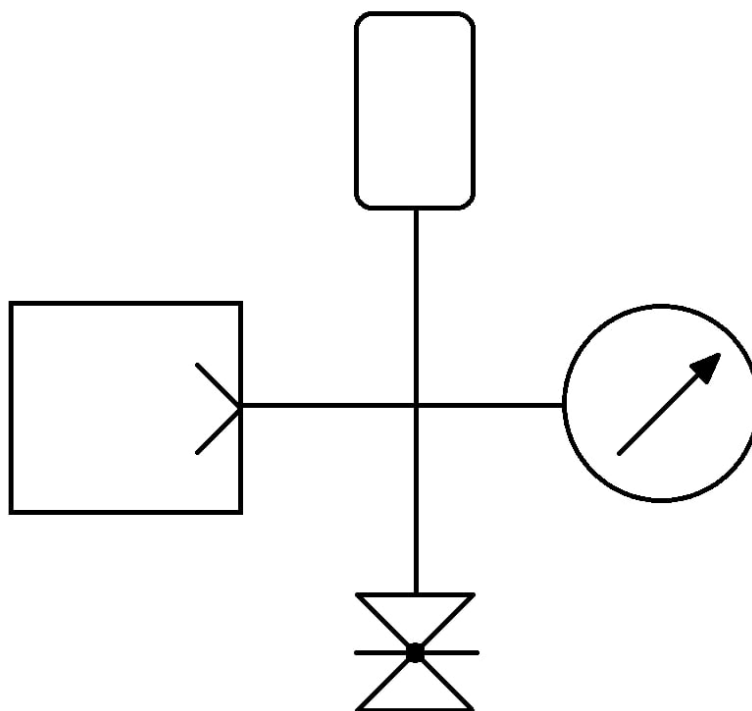


Рисунок 5: схема установки №3, конфигурация 1

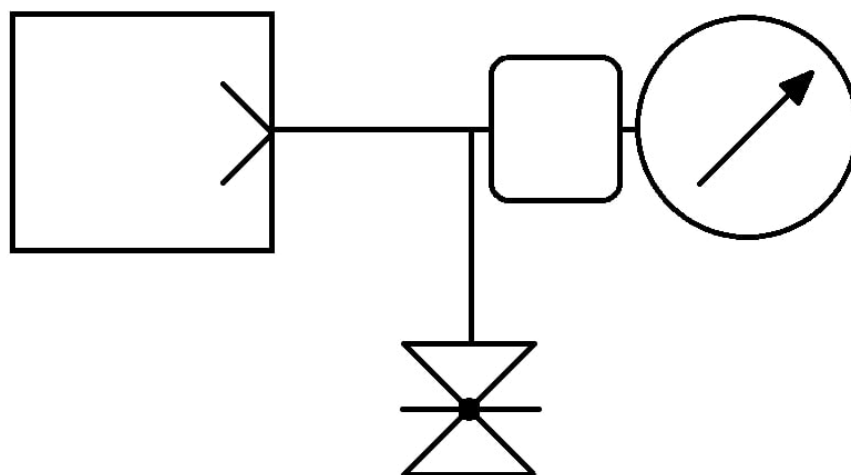


Рисунок 6: Схема установки №3, конфигурация 2

Для такой системы мы измерили давление в 2 точках у насоса (поз. 1) и на конце шланга (поз. 2)

Затем мы решили модифицировать нашу систему, и создали последнюю схему

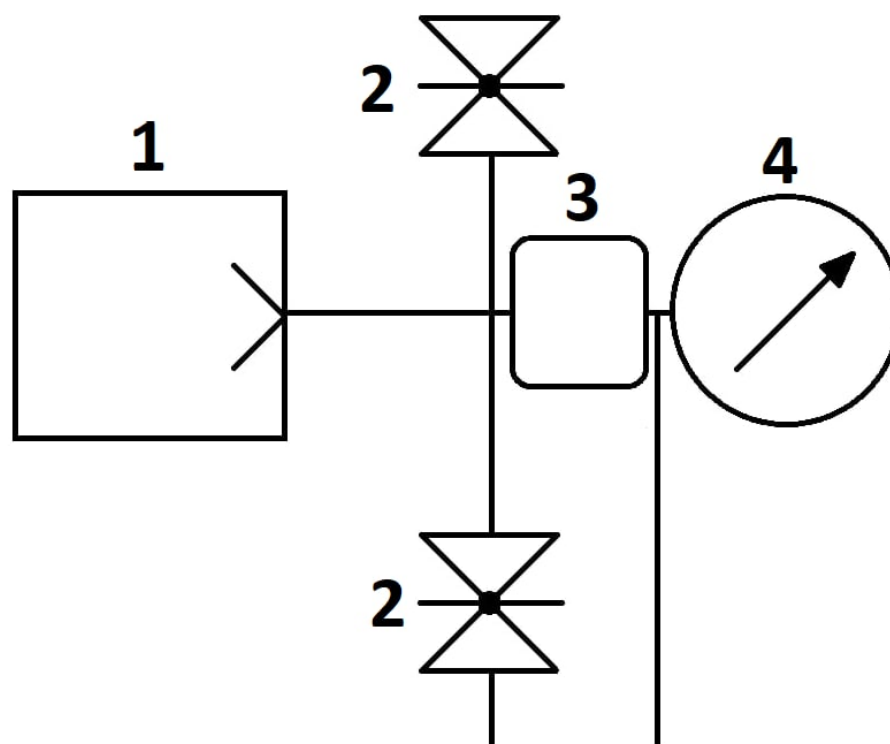


Рисунок 7: Схема установки №4

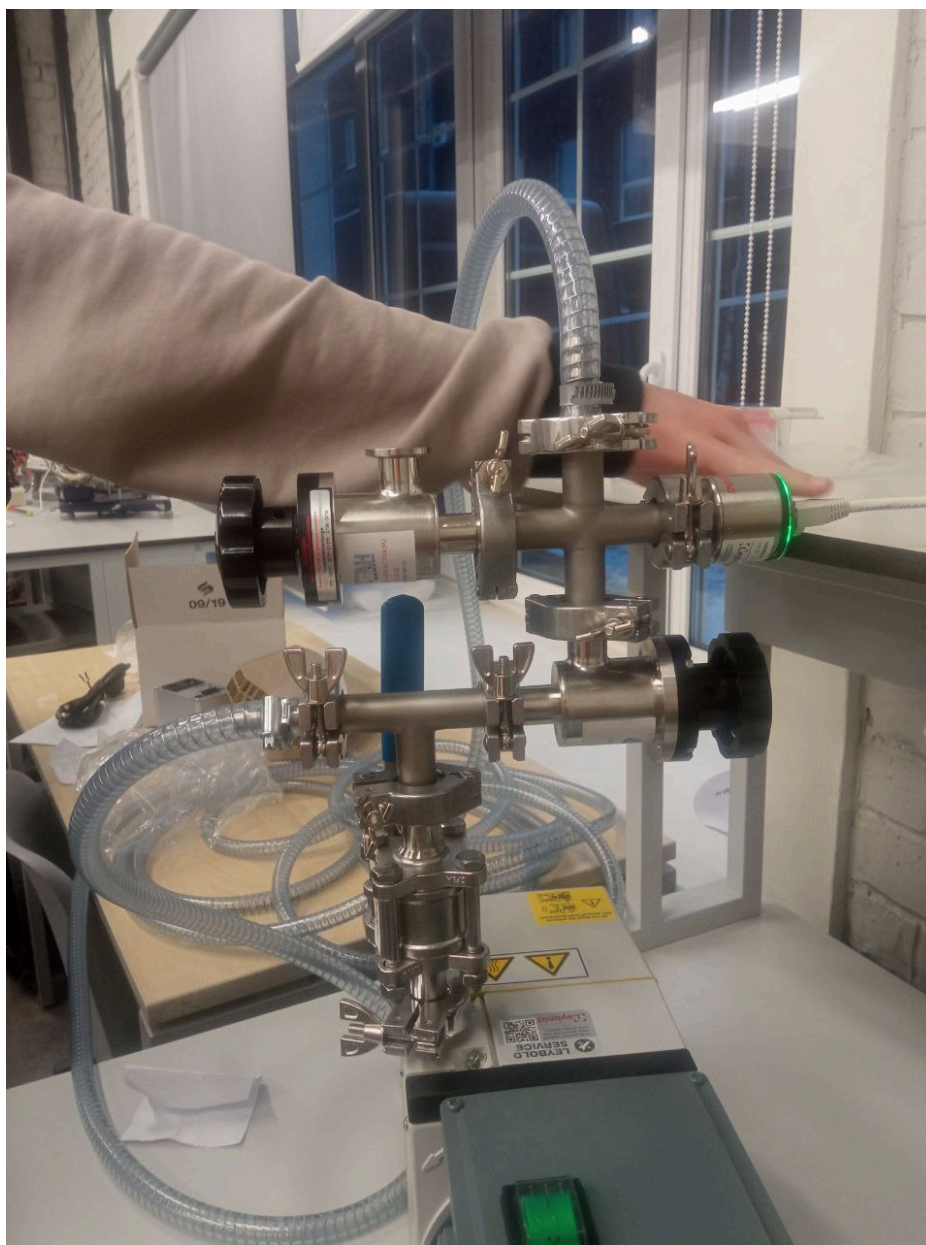


Рисунок 8: Фотография системы

Весь смысл этой системы в том, что мы можем открывать и закрывать клапан (2), тем самым меняя расстояние от барометра до насоса. Это, в свою очередь, позволит нам наглядно увидеть, каким образом изменяется давление в зависимости от состояния системы.

Программная обработка

Для обработки цифр с изображений использовался скрипт на языке Python с помощью технологии OpenCV. Сначала планировалось использовать нейронные сети, но из-за низкой скорости работы и отсутствия простых решений их интеграции в распознавание цифр с видео мы решили использовать более простой метод. Мы использовали несколько сверток для выделения контуров, среди которых позже искали что-то, похожее по размеру на цифры. Далее, через линейные преобразования преобразовывали каждую цифру к “правильному” расположению, а затем смотрели на распределение “закрашенных” пикселей, сопоставляя их распределение конкретной цифре.

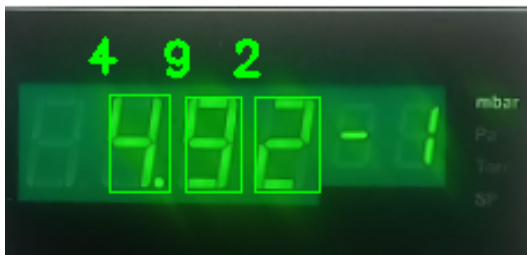


Рисунок 9: Дебаговый кадр для отладки распознавания

К сожалению, у такого подхода есть несколько неприятных моментов. В первую очередь, мы не можем уловить позицию точки (слишком маленький объект), то есть у нас будут проблемы с распознаванием порядков $10^3 - 1 \text{ mbar}$. Меньшие мы сможем распознать, так как сможем распознать множитель справа.

Во-вторых, распознаватель основан на точном пространственном распределении пикселей, а не “образах”, в отличие от нейронных сетей, поэтому он легко может выдать мусор из-за небольших изменений освещения, изменения ракурса и размытия. Нам удалось сделать такие ошибки незначительными по своему количеству, но они по-прежнему остаются. Работать с такими данными на порядок сложнее, чем с “нормальными” из-за большого количества выбросов.

Результаты

Далее мы приведем некоторые графики измерений, указанных выше. Полностью проанализировать их все у нас не хватит сил и времени, поэтому оставим

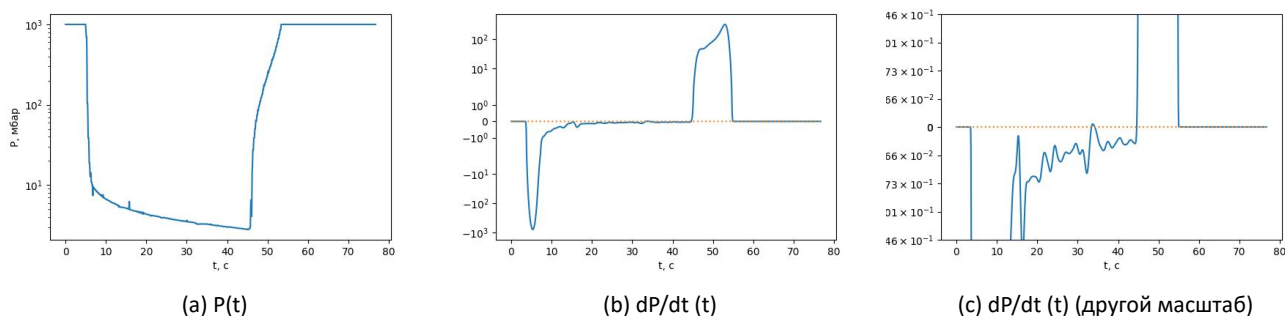


Рисунок 10: Измерение с крышками №1

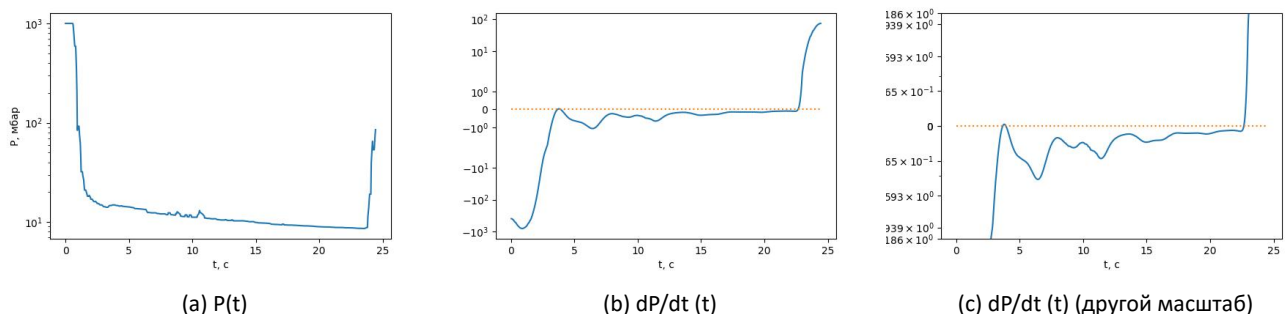


Рисунок 11: Измерение с крышками №2

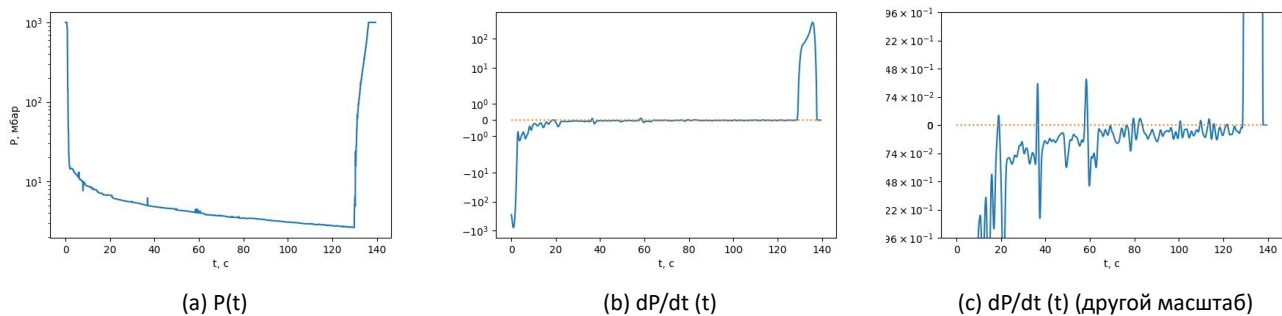


Рисунок 12: Измерение с крышками №3

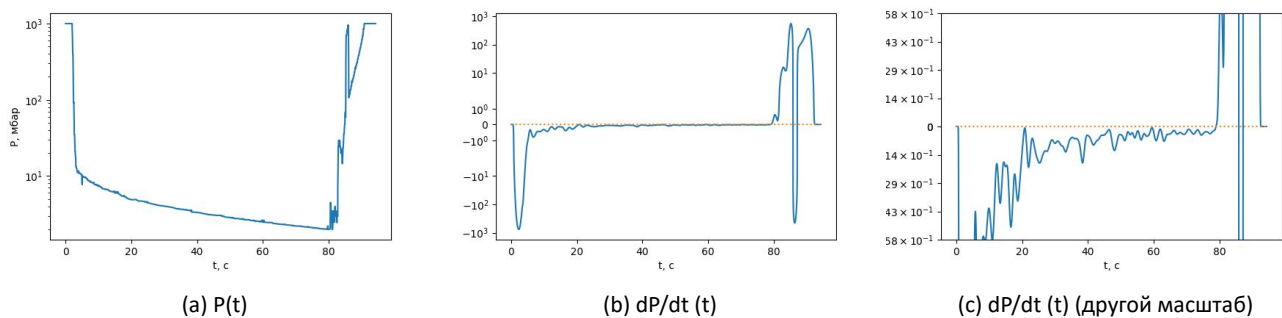


Рисунок 13: Пересобранная установка с крышками

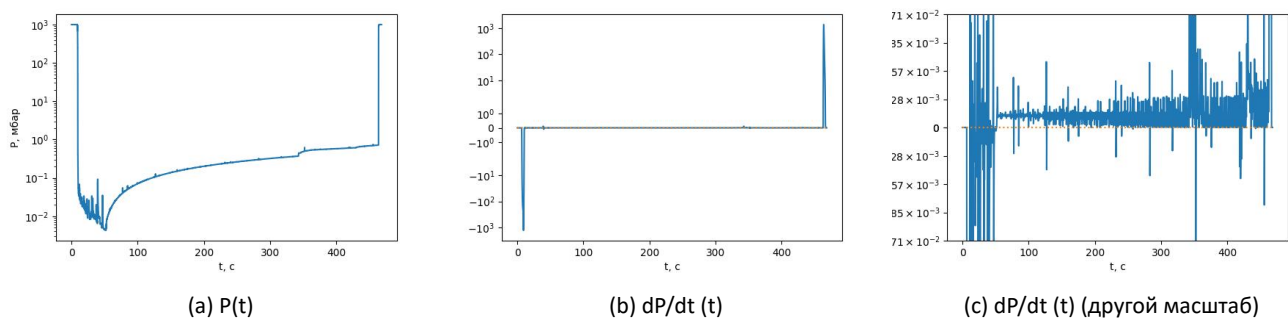


Рисунок 14: Схема №1

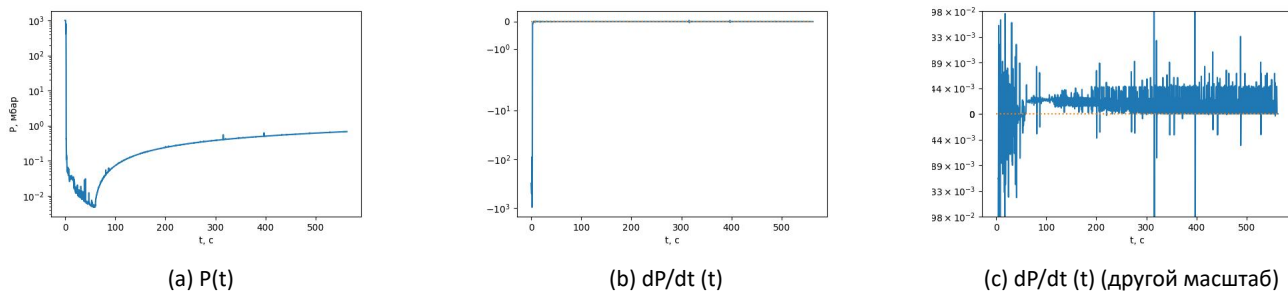


Рисунок 15: Схема №2

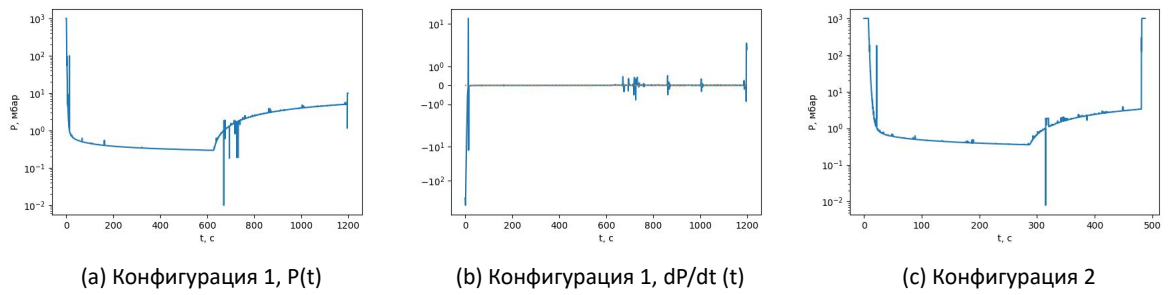


Рисунок 16: Схема №3

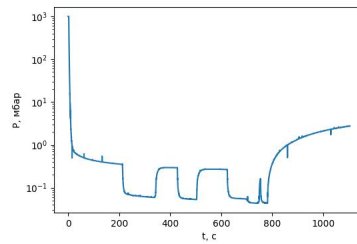


Рисунок 17: Схема №4, задвижка закрыта, в середине измерения (около измерения) дополнительно её открывали и закрывали

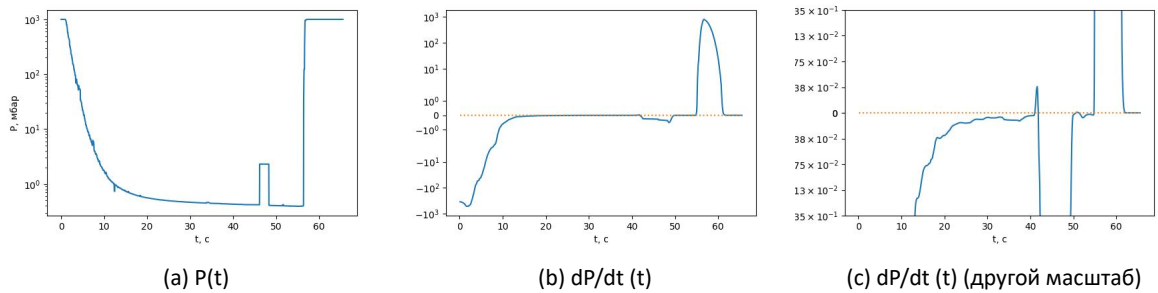


Рисунок 18: Схема №4, дополнительное измерение с закрытой задвижкой

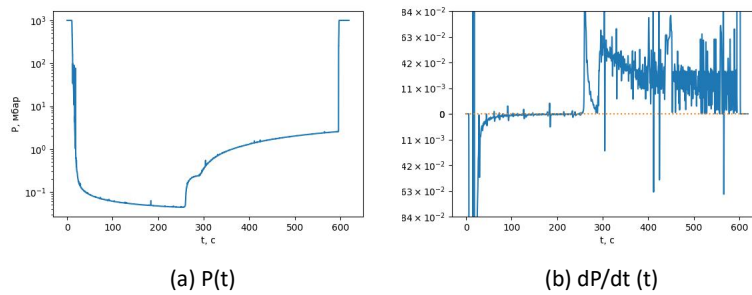


Рисунок 19: Схема №4, Измерение с открытой задвижкой

Мы попробовали приблизить некоторые из полученных нами зависимостей с помощью экспонент, функций вид

$\alpha e^{-bt} + p_0$. К сожалению, графики экспонентами приближаются только кусочно, скорее всего, на разных порядках давления в силу вступают различные эффекты, и однозначно определить “закон откачки” не так просто.

Все коэффициенты на прямых приведены в стандартных единицах осей — мБарах и секундах, функции заданы без вычета сдвига — то есть $t = 0$ соответствует абсолютному значению времени, а не началу определения функции.

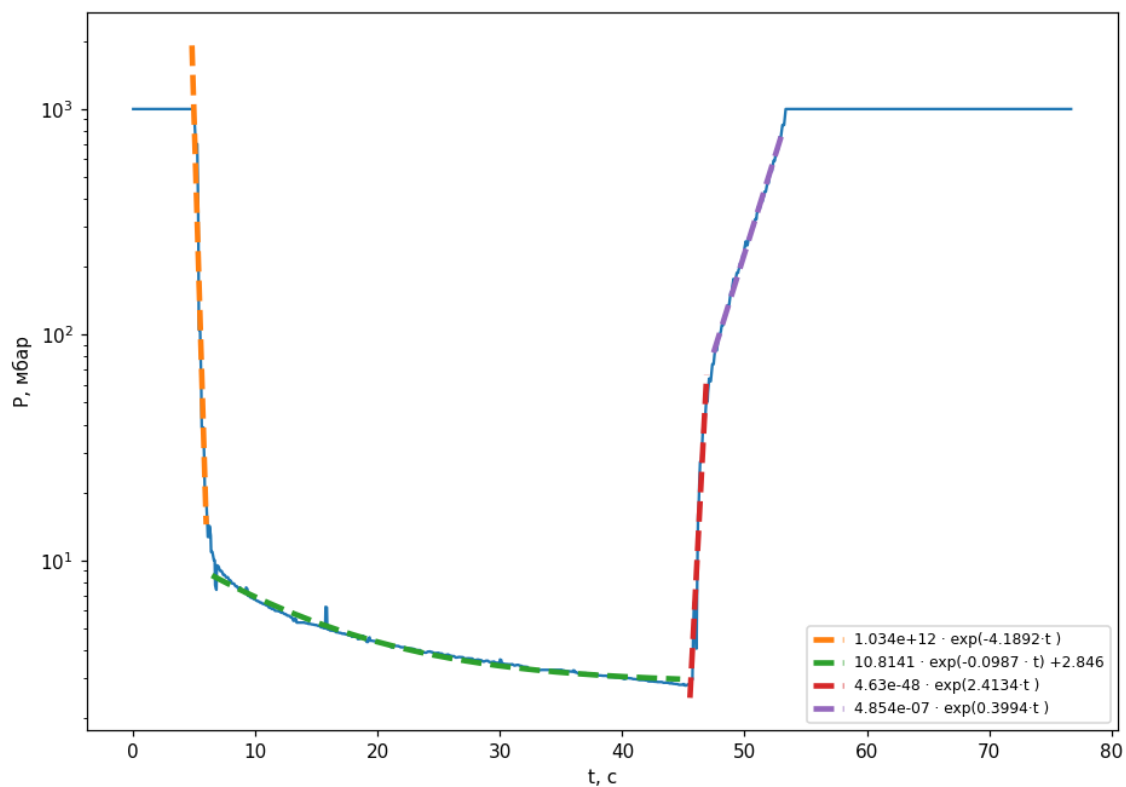


Рисунок 20: Приближенное измерение с крышкой

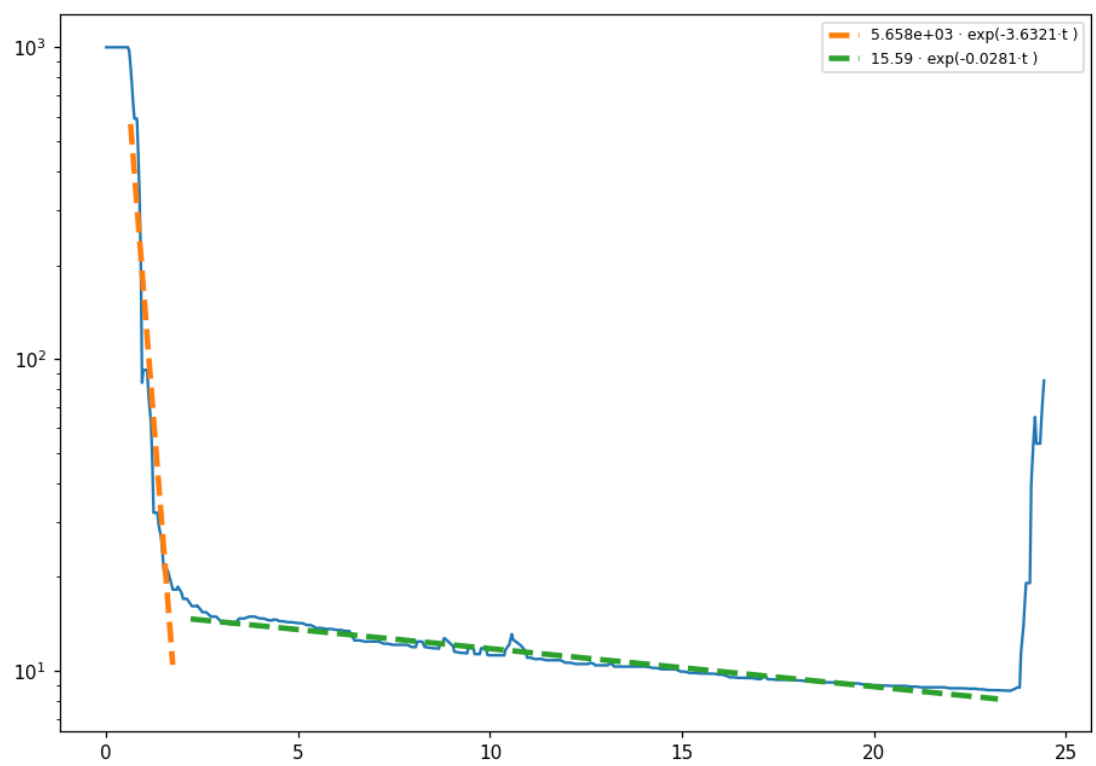


Рисунок 21: Приближенное измерение после пересборки

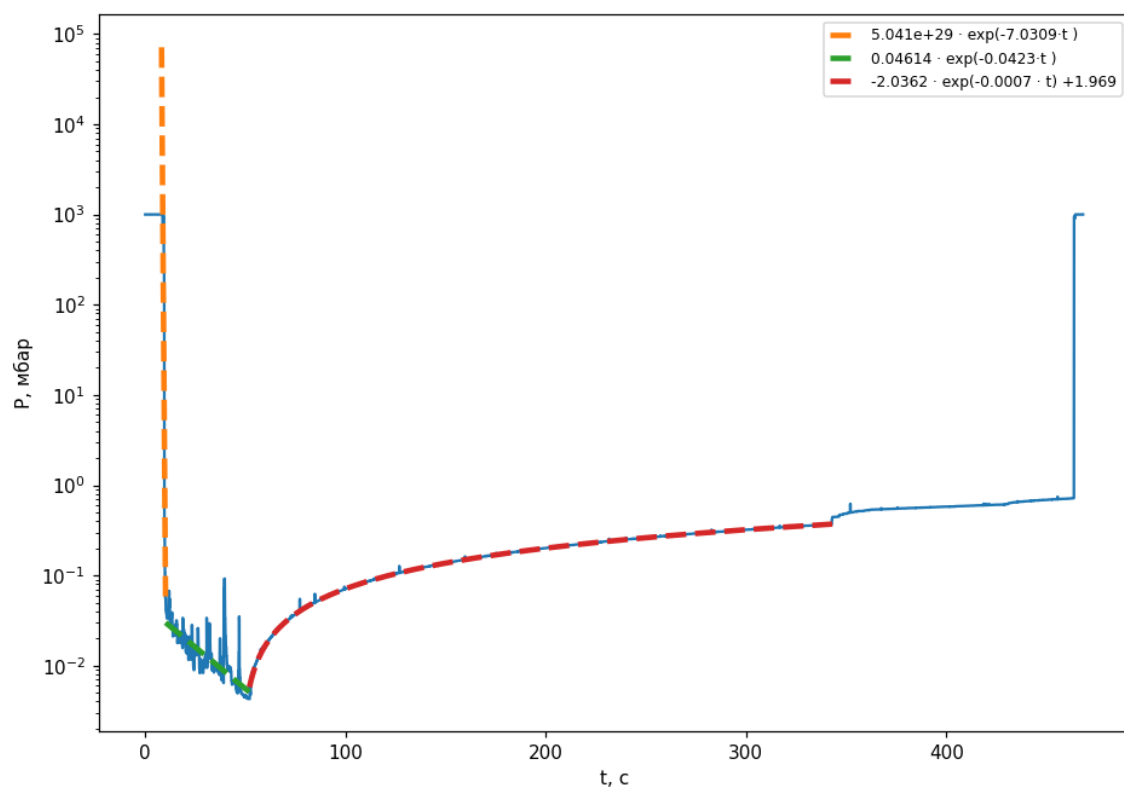


Рисунок 22: Приближенное измерение со схемы №1

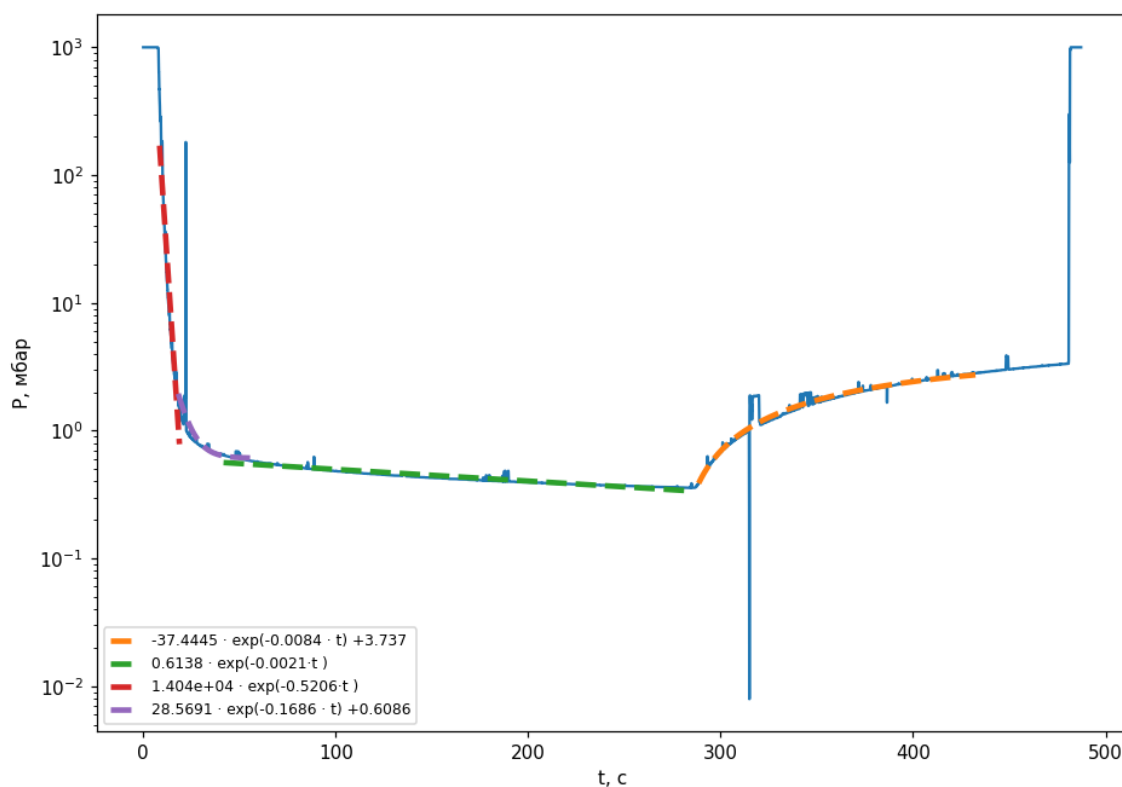


Рисунок 23: Приближенное измерение со схемы №3, конфиг. 2

Мы планировали как следует поработать с результатами аппроксимаций, но из-за жестких временных рамок не успели это сделать. Далее мы приведем только достаточно простые рассуждения, а более глубокий анализ экспериментально полученных данных оставим как тему для отдельного исследования.

Теория (возможно, но больше похоже на танцы со скрипкой)

Исходя из данных первого измерения с пробками можно сделать два вывода. Во первых, можно заметить, что процесс откачки — содержит в себе несколько точек с большим изгибом зависимости, из чего можно сделать вывод о том, что в эти моменты пробки переходят из положения “плохо прижатых” в положение “хорошо прижатых”, или наоборот (меняя количество воздуха проникающее в схему за малый промежуток времени).

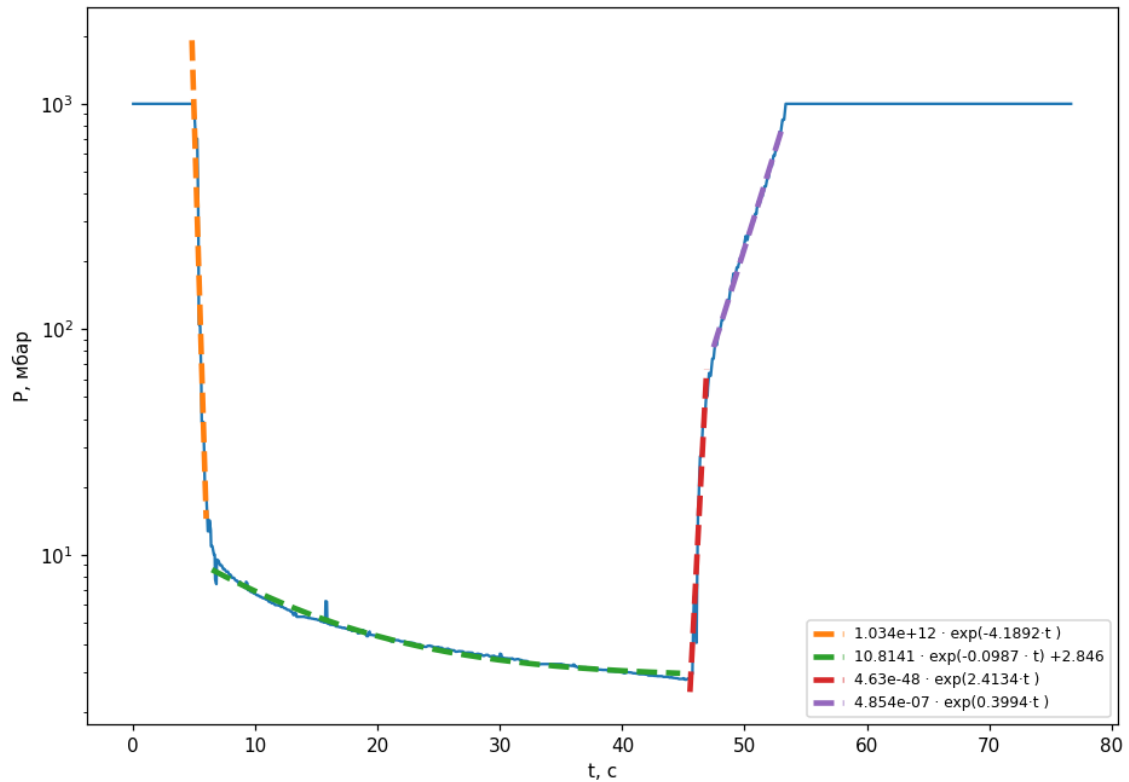


Рисунок 24: 5567

В качестве второго вывода хочется заметить, что экспонента хорошо кусочно приближает зависимость давления от времени. Тогда $\frac{dp}{dt}$ — тоже экспонента, и $\frac{dp}{dt} = c_1 p + c_2$. Докажем это теоретически. Будем считать вакуумный насос идеальным, и что если молекула попала в него, то она выходит из системы. Тогда:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{dP_{in}}{dt} - \frac{dP_{out}}{dt} = c_1 * (P_{atm} - P) - \frac{dn}{dt} * kT$$

Так как $\frac{dn}{dt}$ линейно зависит от давления, то:

$$\frac{dP}{dt} = c_1(P_{atm} - P) - {}_2P = c - aP$$

Но если углубиться ещё глубже, воздух попадающий в систему - проходит в неё в разных точках, с разными давлениями, в зависимости от расстояния до насоса. N - количество стыков, P_i давление газа внутри на этом стыке, а $\langle P \rangle$ - среднее давление в системе

$$\frac{d\langle P \rangle}{dt} = \sum_{i=1}^N c_1(P_{atm} - P_i) - {}_2P$$

Так как давление падает очень быстро будем считать ${}_1P_i \ll {}_1P$

$$\frac{d\langle P \rangle}{dt} = \sum_{i=1}^N c_1 P_{atm} - {}_2P$$

Так как откачка происходит в одном месте, то распределение давления должно быть линейным (в зависимости от расстояния до насоса)

Выводы

Мы рассмотрели большое количество конфигурации одной, достаточно простой установки с одним измерительным прибором.