

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

## Измерение расхода затопленной струи

Выполнили:

Лысенко Ярослав

Калашников Пётр

Ванин Клим

Долгопрудный, 2025

# СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 Цели и задачи.....	3
1.1 Цель работы.....	3
1.2 Задачи.....	3
2 Теория.....	3
2.1 Термины и определения.....	3
2.2 Физическая система.....	4
2.3 Экспериментальная установка.....	5
3 Программа и методика измерений.....	6
3.1 Программа измерений.....	6
3.2 Методика измерений.....	7
4 Обработка данных.....	7
4.1 Калибровка.....	7
4.2 Вычисление расхода затопленной струи.....	9
4.3 Графики зависимости давлений и скоростей для различных расстояний.....	13
4.4 График зависимости расхода от расстояния.....	15
5 Результаты.....	15
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	17

## ВВЕДЕНИЕ

Перед нашей группой стояла задача выполнить лабораторную работу в рамках курса общеинженерной подготовки, заключающуюся в исследовании затопленной струи воздуха и качественном определении зависимости её расхода от расстояния до сопла.

### 1 Цели и задачи

#### 1.1 Цель работы

Определить зависимость расхода затопленной струи от расстояния до сопла.

#### 1.2 Задачи

1. Получить и сохранить показания АЦП при выключенном вентиляторе, получить показания цифрового манометра при таких же условиях.
2. Получить и сохранить показания АЦП при включенном вентиляторе, получить показания цифрового манометра при таких же условиях.
3. Провести калибровку значений АЦП при помощи полученных данных.
4. Провести калибровку шагового двигателя.
5. Провести измерения датчиком на разном расстоянии от сопла.
6. Используя формулу Бернулли, вычислить скорости по показаниям давления в каждый момент измерения.
7. Построить и отцентрировать график скоростей.
8. Посчитать площадь под графиком каждого расстояния, тем самым найдя расход.
9. Построить график зависимости расхода от расстояния до сопла.

### 2 Теория

#### 2.1 Термины и определения

**Жидкие или газовые струи** — потоки жидкости или газа, не имеющие твердых границ. Струи классифицируются по ряду признаков. Прежде всего, различают затопленные и не затопленные струи.

**Затопленная струя** — течение, которое возникает при истечении в покоящуюся окружающую среду потока жидкости или газа, находящегося в том же фазовом состоянии, что и окружающая среда.

**Свободное течение** — течение, при котором твердые стенки находятся на большом расстоянии от потока и не оказывают влияния на течение.

## 2.2 Физическая система

Рассмотрим структуру затопленной свободной струи и процесс ее распространения. Струя жидкости (газа), попадая в массу окружающей ее жидкости (газа), постепенно расширяется и, в конечном счете, рассеивается в жидкости (газе).

Течение в затопленной струе можно разбить на несколько участков, находящихся на различном расстоянии от отверстия, из которого истекает поток. Схема затопленной струи приведена на рисунке 1.

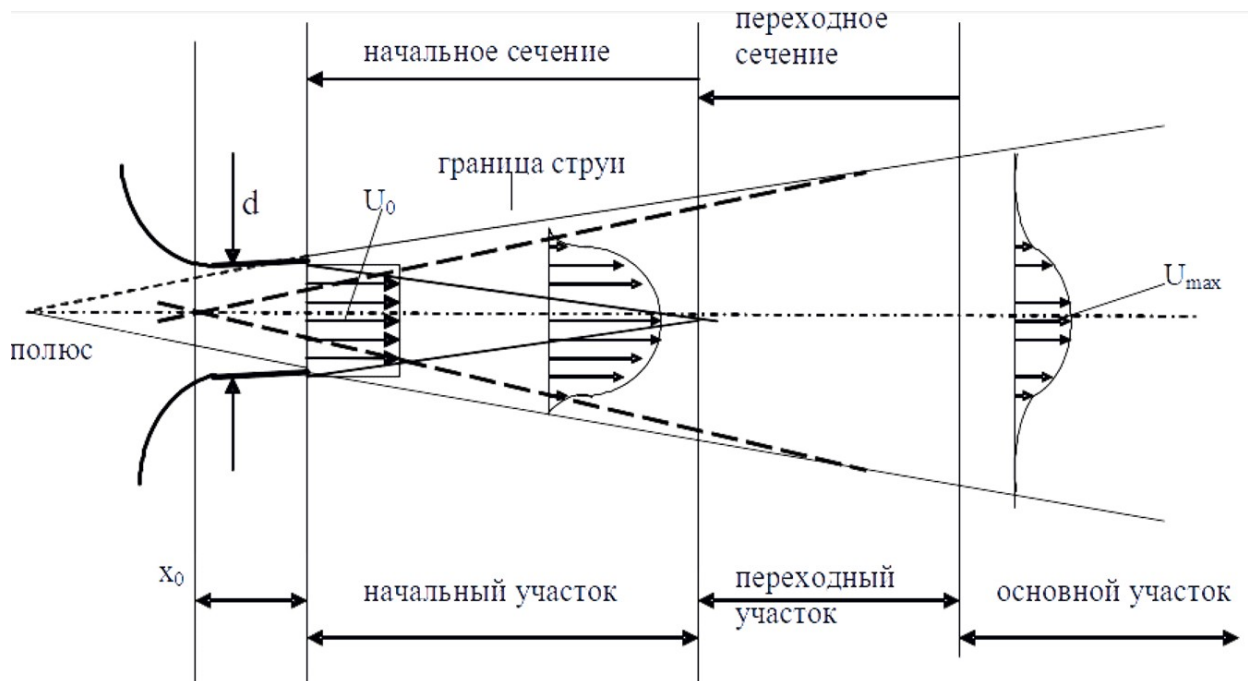


Рисунок 1. Структура струи.

Границей является поверхность раздела, отделяющая саму струю от окружающей ее жидкости. Границей струи будем считать точки, в которых

отношение скорости к скорости на оси имеет некоторое фиксированное значение. Поверхность струи по границам может быть «взрыхленной».

На границе струи с окружающей неподвижной жидкостью происходит перемешивание между струей и окружающей жидкостью из-за эффекта вязкости и явления диффузии (броуновское движение) в ламинарном течении или интенсивных пульсаций скорости при турбулентном течении. Перемешивание приводит к тому, что между струей и окружающей средой происходит обмен количеством движения, струя «подтормаживается», расширяется и одновременно увлекает с собой часть «внешней» жидкости. Вследствие этих эффектов расход струи увеличивается.

Давление по длине струи сохраняется постоянным и равным давлению в окружающем пространстве. Количество движения струи по длине может меняться только из-за создающихся внешних вихрей и практически не изменяется.

### 2.3 Экспериментальная установка

Общий вид экспериментальной установки показан на рисунке 2



Рисунок 2: Экспериментальная установка.

Основными элементами установки являются сопло, установка с шаговым двигателем, позволяющим перемещать трубку Пито перпендикулярно потоку газа, компьютер, датчик давления с АЦП. Схема экспериментальной установки показана на рисунке 3.

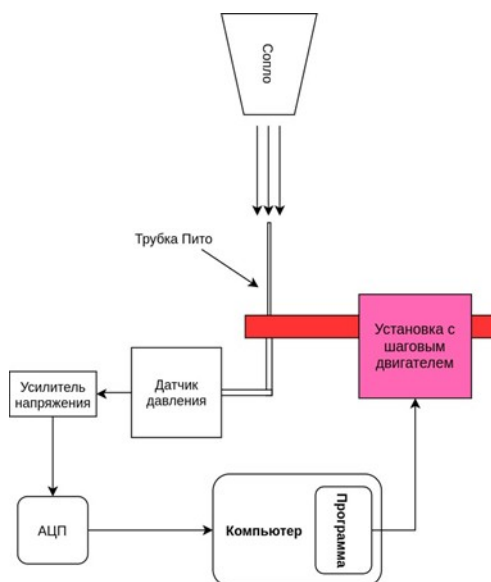


Рисунок 3: Общая схема экспериментальной установки.

В соответствии со схемой установки, сопло, формируемая им воздушная струя являются физической системой, которая подвергается исследованию. В момент запуска программы на компьютере предполагается, что будет подаваться сигнал на исполнительное устройство, заставляя трубку Пито переместиться вдоль струи на нужное расстояние, затем программой будет считано подряд несколько показаний датчика давления, вычислена средняя величина и произведена запись в файл. На следующем шаге описанная последовательность действий должна быть повторена. Таким образом можно провести все необходимые измерения вдоль струи.

### **3 Программа и методика измерений**

#### **3.1 Программа измерений**

1. Получить и сохранить показания АЦП при выключенном вентиляторе (500 точек)
2. Измерить давление в струе цифровым манометром с трубкой Пито при включённом вентиляторе (закрывать листком бумаги вход вентилятора, чтобы манометр не зашкаливал)
3. Получить и сохранить показания АЦП при измеренном манометром давлении (500 точек)
4. Получить и сохранить показания АЦП для сечения на расстоянии 00 мм от сопла (600 точек)
5. Получить и сохранить показания АЦП для сечения на расстоянии 10 мм от сопла (600 точек)
6. Получить и сохранить показания АЦП для сечения на расстоянии 20 мм от сопла (600 точек)
7. Получить и сохранить показания АЦП для сечения на расстоянии 30 мм от сопла (600 точек)
8. Получить и сохранить показания АЦП для сечения на расстоянии 40 мм от сопла (600 точек)
9. Получить и сохранить показания АЦП для сечения на расстоянии 50 мм от сопла (600 точек)
10. Получить и сохранить показания АЦП для сечения на расстоянии 60 мм от сопла (600 точек)
11. Получить и сохранить показания АЦП для сечения на расстоянии 70 мм от сопла (600 точек)

### 3.2 Методика измерений

Путем написания программы на Python, которая подает сигнал на шаговый двигатель, передвигающий трубку Пито, считывает и сохраняет показания датчиков в разных точках струи. Ход работы отражен на рисунках 4 и 5.

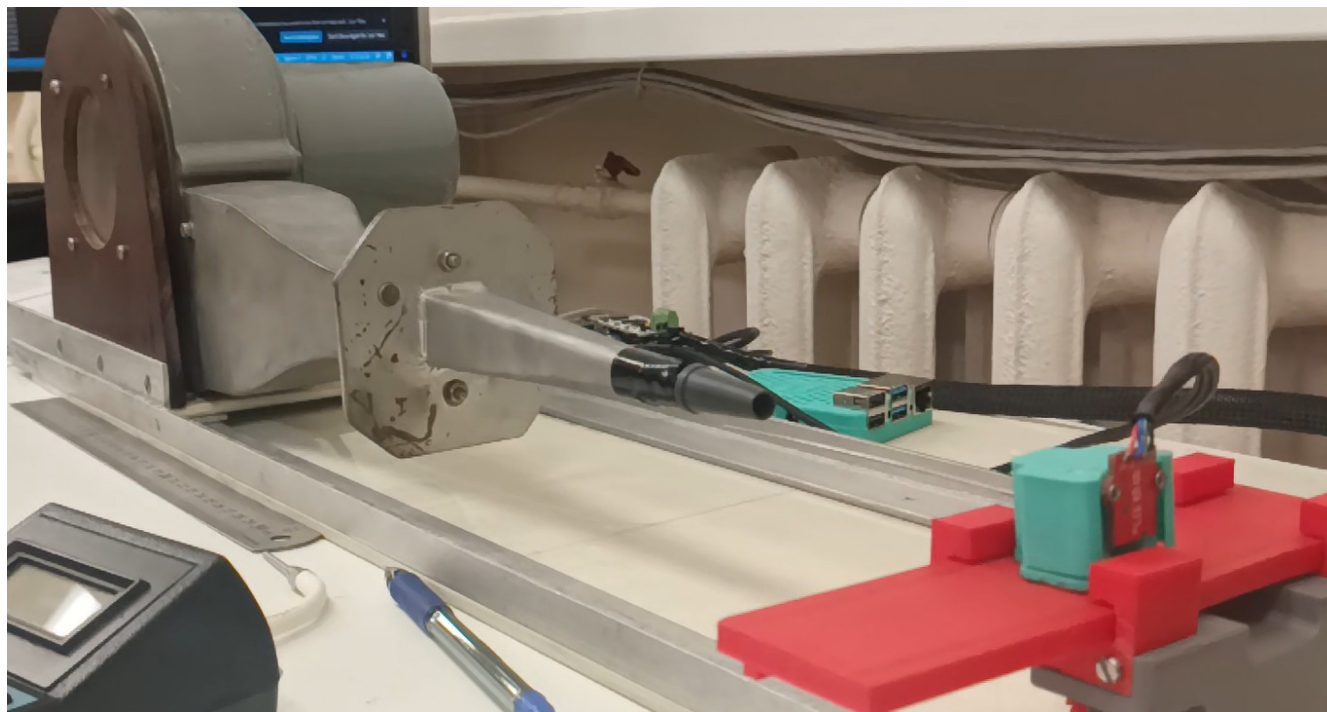


Рисунок 4: Ход работы.

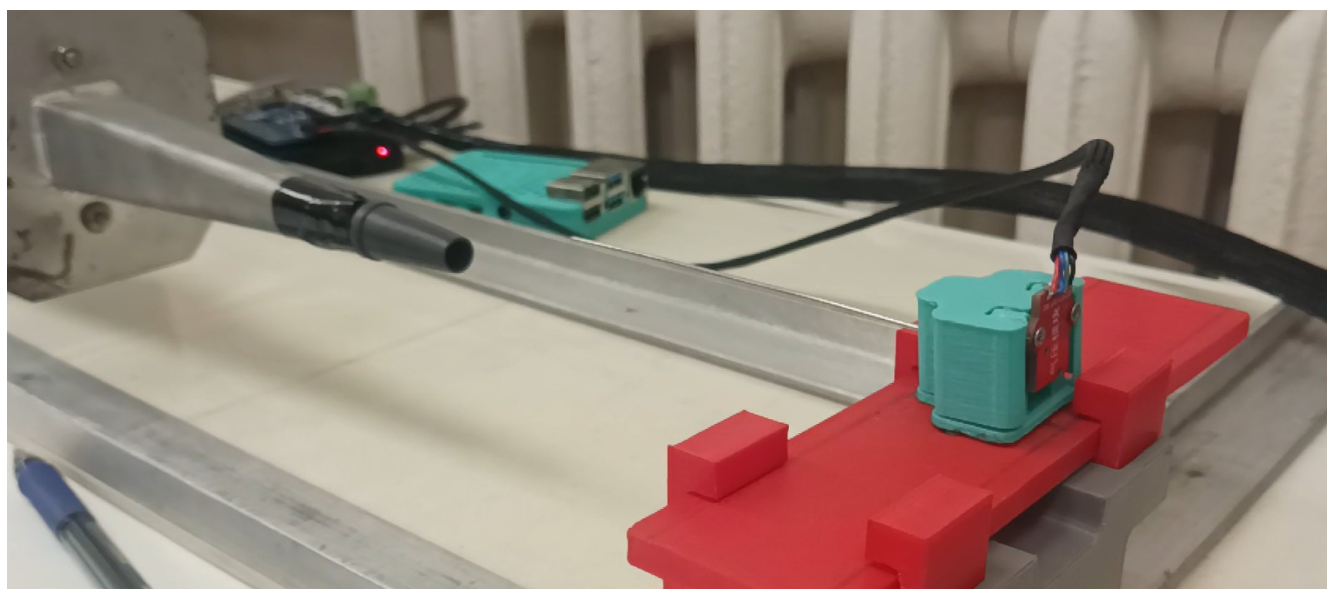


Рисунок 5: Ход работы.



## **4 Обработка данных**

### **4.1 Калибровка**

С помощью калибровочных скриптов мы получили графики зависимости пройденного кареткой расстояния в см от количества шагов мотора. А также отчетов АЦП от показаний барометра. Графики данных калибровок представлены на рисунках 6 и 7. Отметим, что относительная погрешность измерений показаний АЦП составила 1%, а шагового двигателя — 1.5%. На рисунке 8 можно заметить, что показания АЦП при нормальном давлении и отсутствии потока воздуха от сопла различаются и очень часто «скачут». Именно этот эффект и внес погрешность измерения давления. Погрешность калибровки шагового двигателя же вызвана непрочным и нестабильным соединением между шестерней и двигающейся платформой, на которой установлена трубка Пито. Жестко стабилизировать эту платформу не получилось. Для более точных значений было несколько раз измерено расстояние, проходимое платформой с датчиком.

Так же во время выполнения работы была проведена оценка на пригодность получаемых данных. После получения данных для нулевого отступа, было вручную проверено, совпадают ли значения диаметра сопла с количеством шагов, при котором было явно высокое давление согласно датчику. Так же была проведена оценка показаний датчика. Оба значения получились в тех пределах погрешностей измерений, которые были упомянуты ранее, а значит калибровка была проведена верна и следующие измерения были корректны.

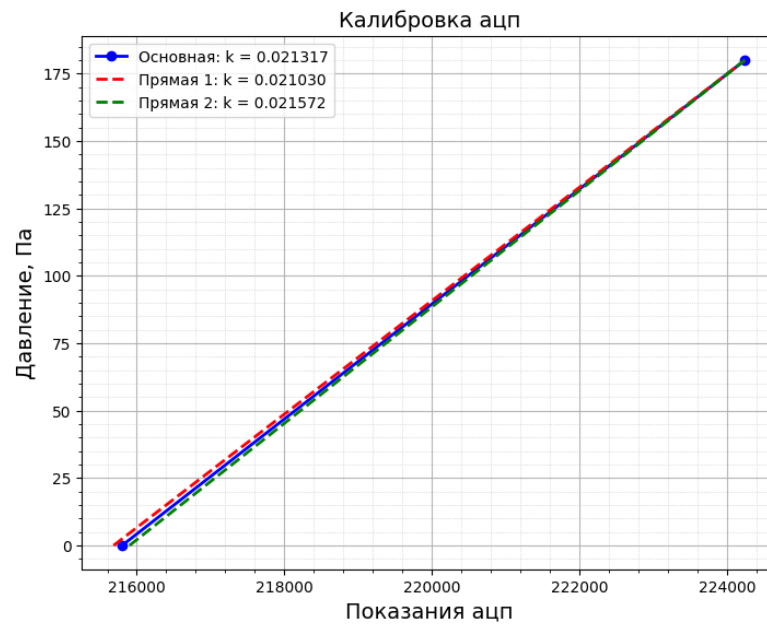


Рисунок 6: График калибровки АЦП.

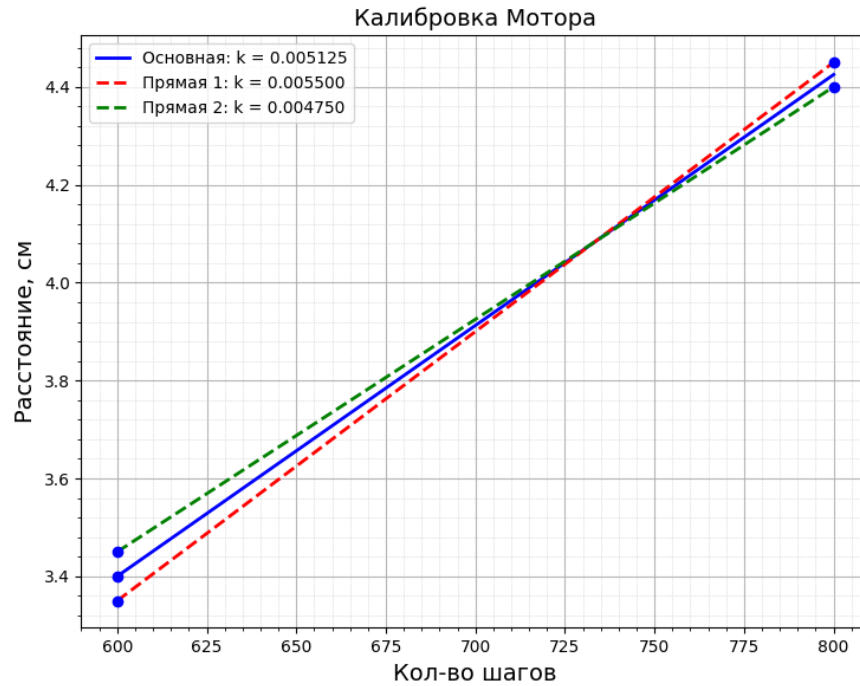


Рисунок 7: График калибровки шагового двигателя.

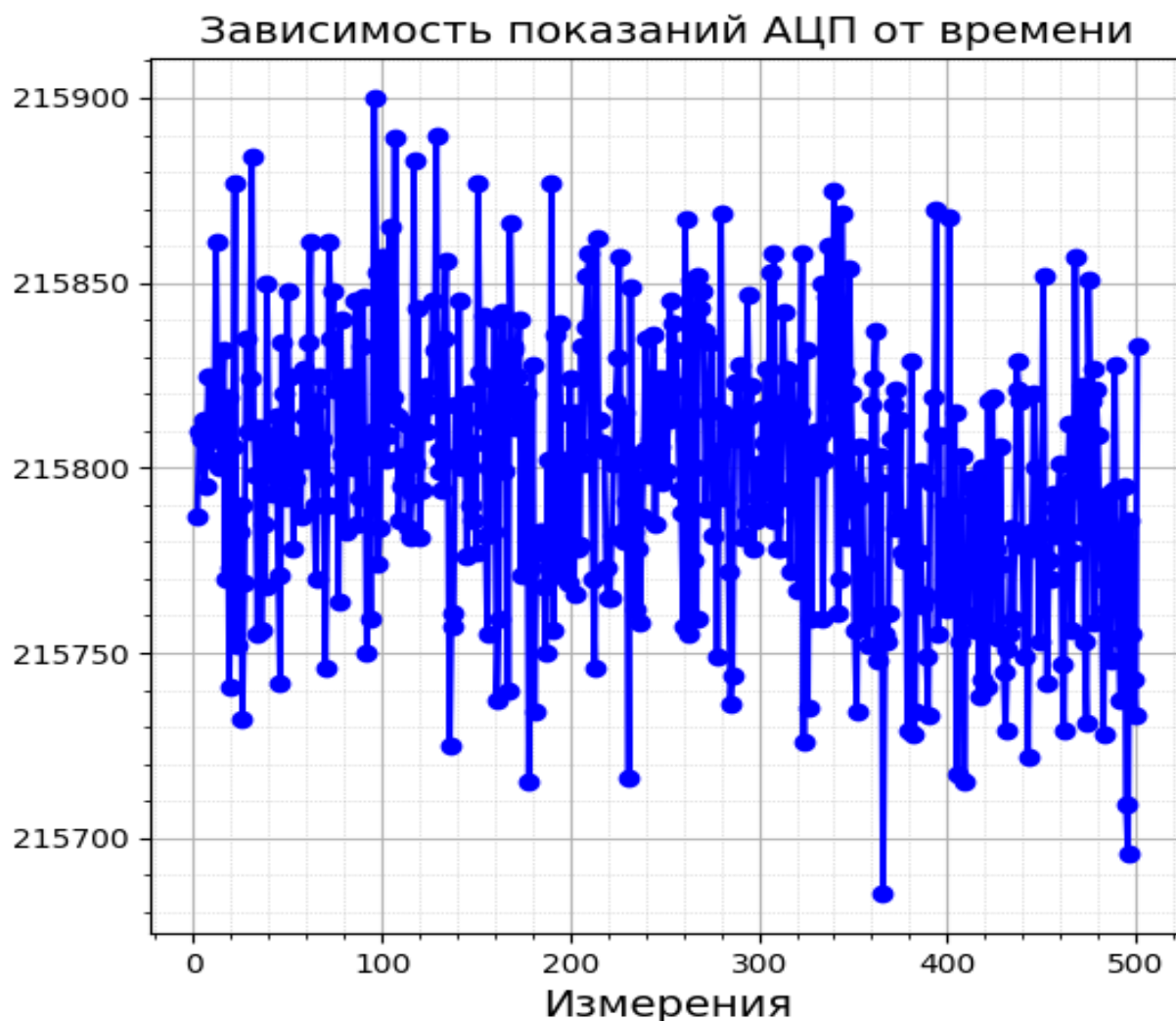


Рисунок 8: Показания АЦП при нормальном давлении.

#### 4.2 Вычисление расхода затопленной струи

В результате экспериментальной работы и обработки экспериментальных результатов для вычисления расхода в отдельных точках определена скорость, и, соответственно, произведение скорости на координату (радиус). Схема отражена на рисунке 9.

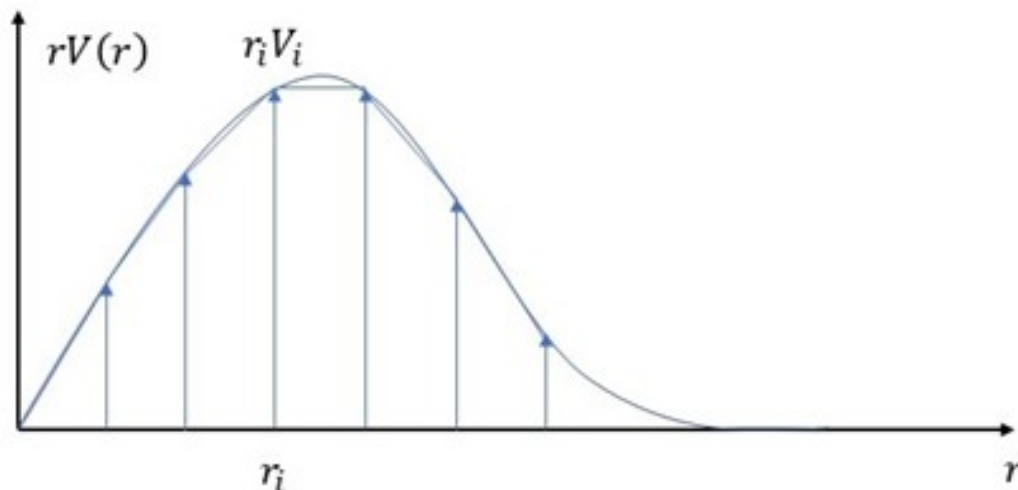


Рисунок 9: Схематическое изображение зависимости

В данном случае искомым расходом является площадь под графиком. Так как измерения проведены в конечном числе точек, то приближенно площадь можно определить, как сумму площадей трапеций, то есть по формуле (1):

$$Q = 2\pi \Sigma = \sum_{i=0}^N 0,5(r_i V_i + r_{i+1} V_{i+1})(r_{i+1} - r_i) \quad (1)$$

Предложенная методика позволяет достаточно точно оценить объемный расход струи, если измерения проведены в достаточно близких друг к другу точках, и для её применения необходимо измерить скорость в нужных точках. Однако, непосредственно измерение в рамках экспериментальной работы скорости件 невозможно, а проводится измерение разности полного давления в струе и в области вне струи. Пока не рассматривая подробно особенности технической реализации в экспериментальной установке данных измерений, скажем, что по измерению давления можно определить скорость, используя формулу Бернулли (2):

$$P + \frac{\rho V^2}{2} = P_0 \quad (2)$$

Второе слагаемое в левой части формулы (2) называется динамическим напором, давление  $P$  – ‘это давление воздуха в текущей точке, а давление  $P_0$  называется давлением торможения. Физический смысл давления торможения состоит в том, что при адиабатическом торможении газа давление возрастет до величины  $P_0$ . Давление  $P$  – это давление в струе, которое примерно равно давлению вне струи.

Из формулы (2) следует, что для измерения полного давления необходимо газ затормозить до почти полной остановки. Для этого в струю вводится трубка, как схематически показано на рисунке 3, направленная по скорости движения потока (такую трубку называют трубкой Пито). Газ, набегаая на трубку, достаточно быстро (а значит адиабатически) тормозится и можно считать, что на входе в трубку его давление равно  $P_0$ . Соответственно, если поставить дифференциальный манометр, измеряющий разность давлений в трубке и вне струи  $P - P_0$ , можно вычислить величину скорости. Также можно считать плотность воздуха равной  $1,2 \text{ кг/м}^3$ .

### 4.3 Графики зависимости давлений и скоростей для различных расстояний

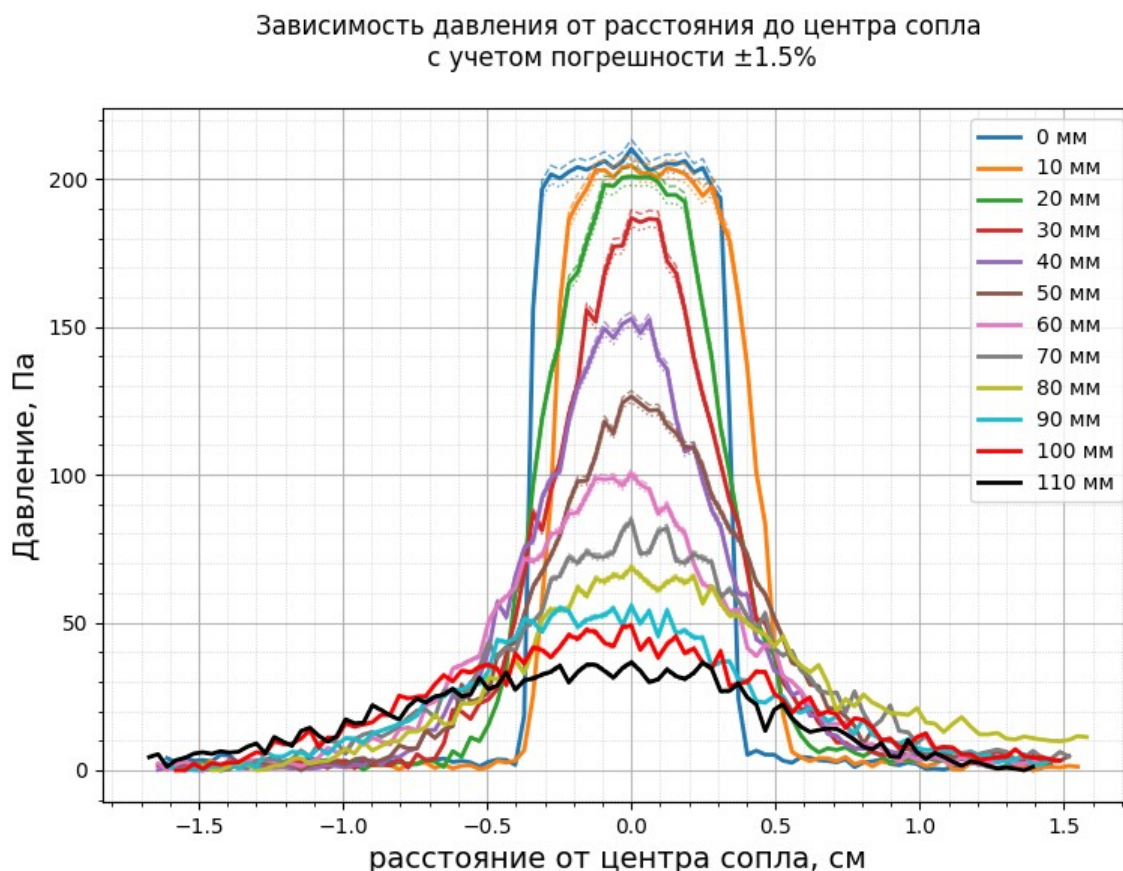


Рисунок 10: График зависимости давления на разных расстояниях от сопла

Исходя из погрешности измерения давления были построены такие зависимости давления. На рисунке 10 пунктирными линиями обозначены предельные значения давлений с учетом погрешностей. Применяя формулу (2) был построен график зависимости скоростей (так же с учетом погрешности измерений), а также посчитаны расходы для каждого расстояния (Рисунок 11). Значения расхода были посчитаны по формуле (1) (и переведены в г/с).

Зависимость скорости от расстояния до центра сопла  
с учетом погрешности  $\pm 1\%$

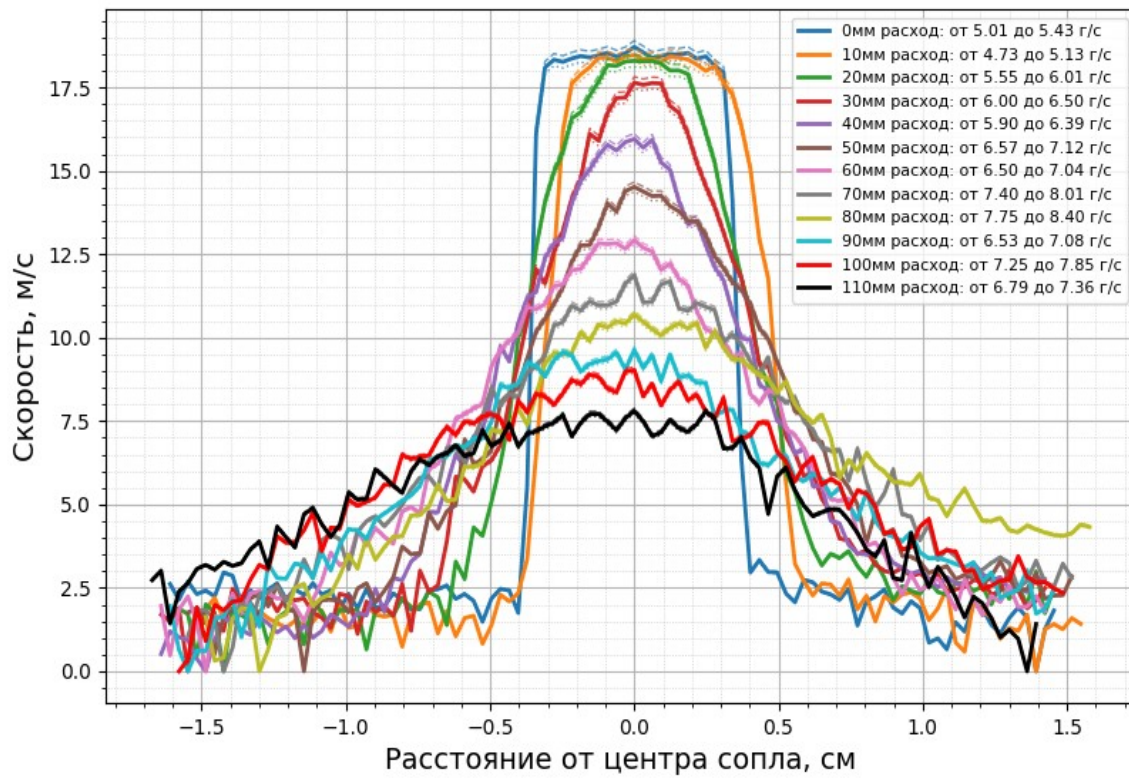


Рисунок 11: График зависимости скоростей на разных расстояниях от сопла.

#### 4.4 График зависимости расхода от расстояния

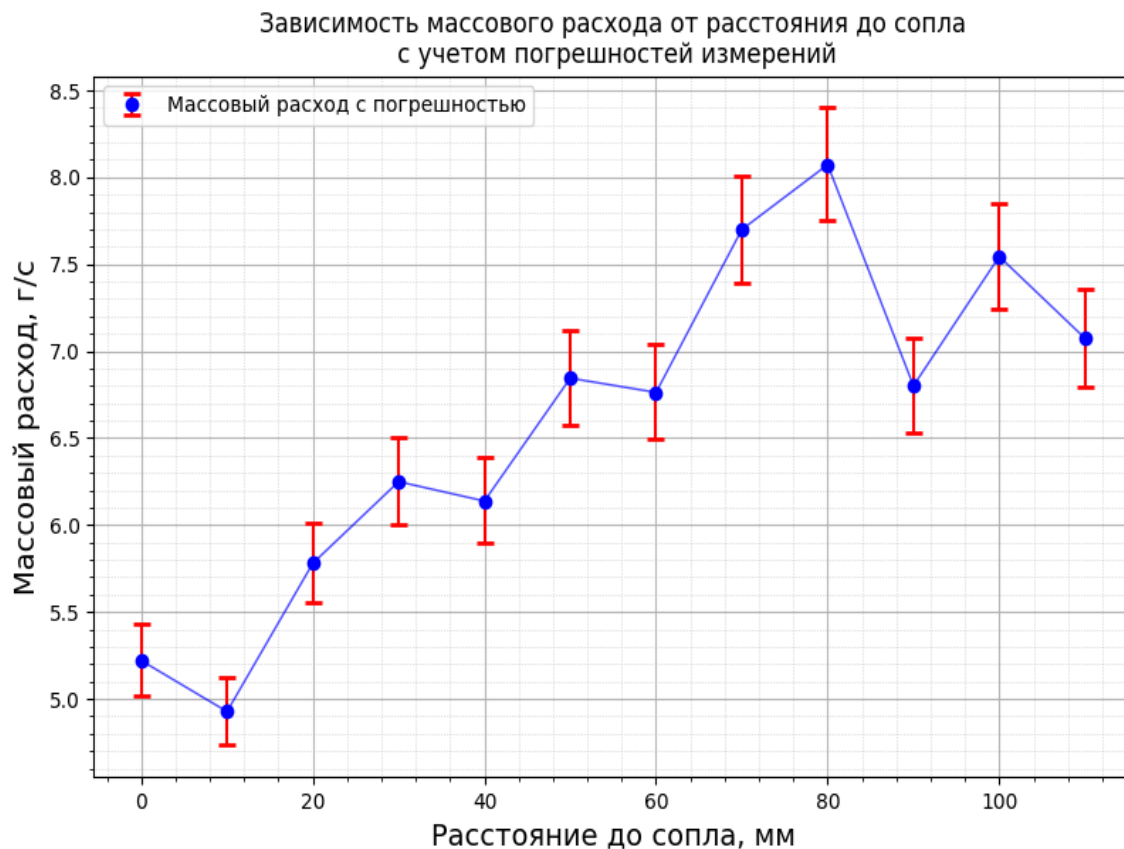


Рисунок 12: График искомой зависимости расхода от расстояния до сопла.

#### 5 Результаты

В ходе вычислений были получены искомые значения расходов. Погрешности посчитаны по формулам частных производных. Систематическая погрешность принята равной 0, так как выявить её не удалось и в паспортах приборов таковой тоже не было указано.



00 мм:  $5.22 \pm 0.21$  г/с  
10 мм:  $4.93 \pm 0.20$  г/с  
20 мм:  $5.78 \pm 0.23$  г/с  
30 мм:  $6.25 \pm 0.25$  г/с  
40 мм:  $6.15 \pm 0.25$  г/с  
50 мм:  $6.85 \pm 0.28$  г/с  
60 мм:  $6.77 \pm 0.27$  г/с  
70 мм:  $7.71 \pm 0.31$  г/с  
80 мм:  $8.08 \pm 0.33$  г/с  
90 мм:  $6.81 \pm 0.28$  г/с  
100 мм:  $7.55 \pm 0.30$  г/с  
110 мм:  $7.08 \pm 0.29$  г/с

На основании этих данных можно построить зависимость расхода от расстояния до сопла (Рисунок 12). На этом графике учтены погрешности измерений, влияющие на итоговые значения расхода. Заметим, что если не учитывать две точки явных выбросов (10мм и 90мм), то заметно, что до 80мм значения расхода растут, а после, начинают убывать. Данная зависимость хорошо согласуется с теорией, так как до какого-то момента, скорость струи убывает, однако так как она затопленная, то она «увлекает» за собой часть внешней, прежде покоящейся, атмосферы, тем самым увеличивая расход. Можно также сделать вывод, что после 80мм скорости струи становится недостаточно, и на этом расстоянии она сильно «затормаживается» внешней атмосферой.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная лабораторная работа подтвердила зависимость изменения скорости потока воздуха в сечении затопленной струи от расстояния до сопла -- чем больше расстояние, тем выше скорость потока воздуха. А значит, с увеличением расстояния увеличивается расход затопленной струи. Этот эффект объясняется влиянием внешней среды на эксперимент, т. е. между атмосферой и потоком воздуха возникает диффузия, которой избежать невозможно.