

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНО-  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

## Лабораторная работа №2 Расход затопленной струи

Выполнили:  
Макаренко Николай  
Тихомиров Андрей  
Янаков Филипп

Долгопрудный, 2021

## Оглавление

1. Введение.....	3
1.1. Цели.....	3
1.2. Задачи.....	3
2. Теория.....	3
2.1. Термины и определения.....	3
2.2. Физическая система.....	3
2.3. Экспериментальная установка.....	6
3. Программа и методика измерений.....	7
3.1. Методика калибровки шагового двигателя.....	7
3.2. Методика калибровки датчика давления.....	7
3.3. Методика измерений.....	7
3.4. Программа эксперимента.....	7
4. Обработка данных.....	8
4.1. Центрирование графиков.....	8
4.2. Вычисление расхода затопленной струи.....	8
4.3. Методика обработки данных.....	9
5. Код программы.....	9
6. Эксперимент.....	9
6.1. Калибровка.....	9
6.2. Графики давления по сечениям.....	9
6.3. График зависимости расхода от расстояния до сопла.....	9
7. Итоги лабораторной работы.....	9

# **1. Введение**

## **1.1. Цели**

При помощи компьютера, АЦП, датчика давления, трубки Пито и шагового двигателя изучить зависимость расхода затопленной струи от расстояния до сопла.

## **1.2. Задачи**

- Ознакомиться с установкой, поняв принцип ее работы
- Написать четыре программы: 1) Программа настройки положения стержня с трубкой Пито; 2) Программа для калибровки датчика давления; 3) Программа для проведения измерений; 4) Программа обработки данных и построения графиков.
- Провести калибровку датчика давления.
- Провести калибровку шагового двигателя.
- Измерить давление в сечении струи на восьми расстояниях от сопла
- Проанализировать полученные данные и вычислить расход струи для каждого сечения. Построить график зависимости расхода струи от расстояния до среза сопла.
- Сделать вывод.

# **2. Теория**

## **2.1. Термины и определения**

- Потоки жидкости или газа, не имеющие твердых границ, называются соответственно жидкими или газовыми струями. Под затопленной струей подразумевается течение, которое возникает при истечении в покоящуюся окружающую среду потока жидкости или газа, находящегося в том же фазовом состоянии, что и окружающая среда.
- Если твёрдые стенки находятся на большом расстоянии от потока и не оказывают влияния на течение, то такие течения называются свободными. В данной работе будет исследоваться течение, возникающее при истечении воздуха в покоящуюся воздушную среду вдали от твёрдых стенок, т.е. свободная затопленная струя.
- Расходом жидкости называется ее объем, проходящий в единицу времени через сечение.

## **2.2. Физическая система**

Для вычисления массового расхода воздуха в струе круглого сечения рассмотрим Рисунок 1, на котором схематически представлен в пространстве профиль скорости в струе.

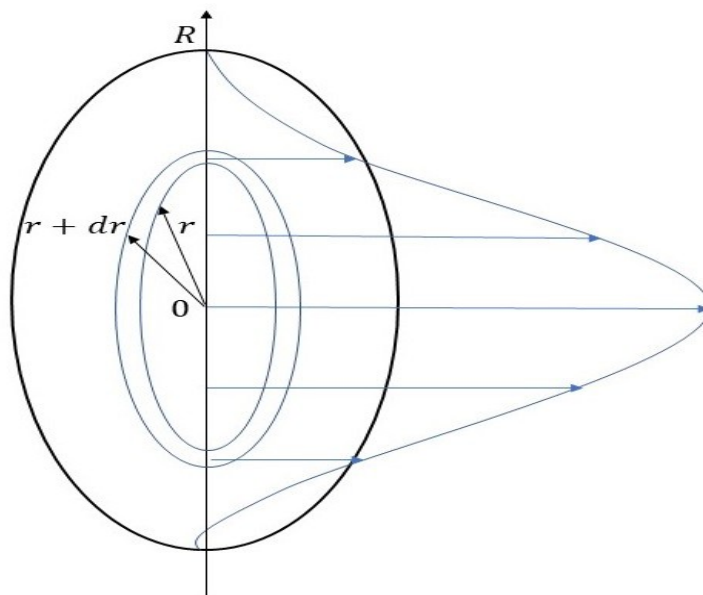


Рисунок 1 — Схематическое изображение профиля скорости в струе

Как видно, в пределах границы струи скорость направлена практически перпендикулярно плоскости сечения, однако её величина изменяется от точки к точке. То, что струя осесимметричная, означает, что величина скорости зависит только от расстояния от её оси  $r$ , и в качестве площадки  $ds$ , в пределах которой скорость меняется мало, можно взять кольцо, содержащие точки на расстоянии от  $r$  до  $r+dr$ . Величина  $dr$  при этом должна быть достаточно мала. Площадь  $ds$  примерно равна  $2\pi r dr$ , тогда поток через площадку можно представить как  $V(r)2\pi r dr$ , а общий объёмный представить как интеграл:

$$Q = \int_0^R 2\pi r V(r) dr \quad (1)$$

Здесь  $R$  – граница струи. Массовый расход можно найти, если плотность газа считать неизменной, и формула преобразуется следующим образом:

$$Q_m = \int_0^R \rho 2\pi r V(r) dr \quad (2)$$

Полученная формула является основной, и из неё видно, что для определения расхода необходимо определить зависимость скорости от расстояния до оси струи, чему и будет посвящено проведение экспериментальной части лабораторной работы и затем обработка экспериментальных результатов.

В результате экспериментальной работы и обработки экспериментальных результатов для вычисления расхода в отдельных точках определена скорость, и, соответственно, произведение скорости на координату (радиус). Схематически это показано на Рисунке 2:

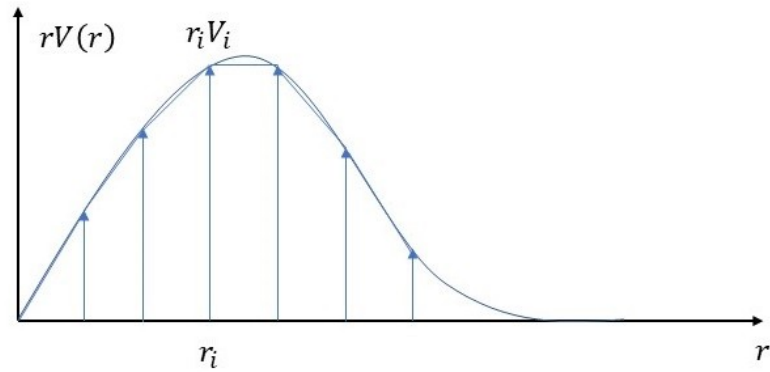


Рисунок 2 - Схематическое изображение зависимости полученных результатов от расстояния до оси струи

В данном случае искомым расходом является площадь под графиком. Так как измерения проведены в конечном числе точек, то приближённо площадь можно определить, как сумму площадей трапеций, то есть по формуле 3:

$$Q = 2\pi \sum_{i=0}^N 0,5(r_i V + r_{i+1} V_{i+1})(r_{i+1} - r_i) \quad (3)$$

Предложенная методика позволяет достаточно точно оценить объёмный расход струи, если измерения проведены в достаточно близких точках друг к другу, и для её применения необходимо измерить скорость в нужных точках. Однако, непосредственно измерение в рамках экспериментальной работы скорости 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 (4):

$$P + \frac{\rho V^2}{2} = P_0 \quad (4)$$

Второе слагаемое в левой части формулы 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 возрастёт до величины  $P_0$ . Давление  $P$  – это давление в струе, которое примерно равно давлению вне струи.

Из формулы (3) 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, набегая 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  $1,2 \text{ кг/м}^3$ .

## 2.3. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки показана на рисунке .

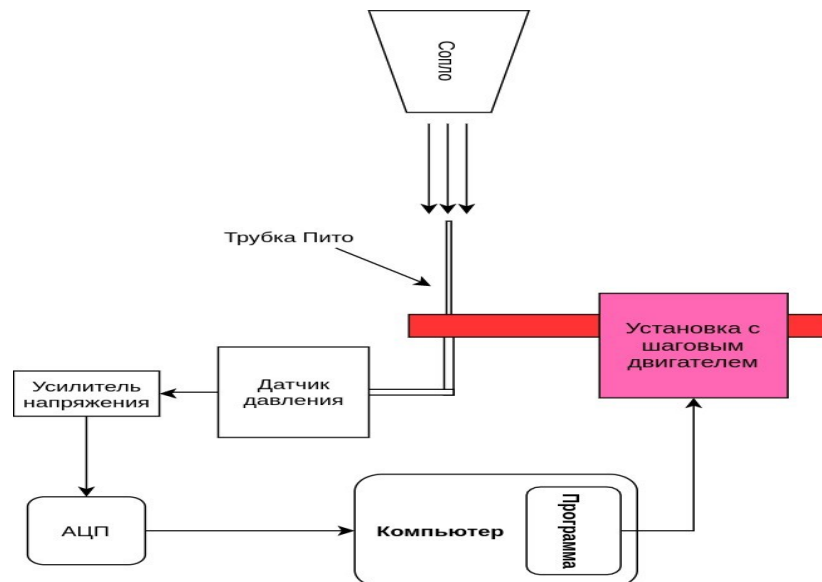


Рисунок 3 — Схема экспериментальной установки

Основными элементами установки являются сопло, установка с шаговым двигателем, позволяющим перемещать трубку Пито перпендикулярно потоку газа, компьютер, датчик давления с АЦП. Общий вид экспериментальной установки показан на Рисунке 4.

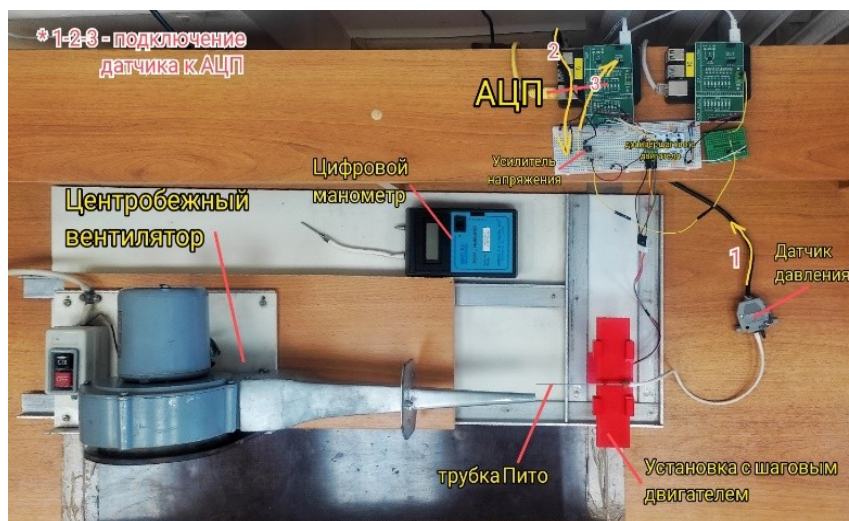


Рисунок 4 -Общий вид экспериментальной установки

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 проведена 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. Методика калибровки шагового двигателя**

Изначально нужно было установить двигатель так, чтобы датчик давления лежал на оси симметрии сопла (т.е. в центр), используя предоставленный код движения двигателя. В результате калибровки также было получено, что 3500 точек соответствуют обходу двигателем 10 см.

#### **3.2. Методика калибровки датчика давления**

Установив датчик давления в самом конце сопла, было получено некоторое значение с помощью АЦП. Затем, установив в то же место манометр, было получено реальное значение давление в Па. С помощью этих измерений была получена зависимость давления от значений с АЦП.

#### **3.3. Методика измерений**

С помощью двигателя, который перемещал датчик, было получено значение АЦП при включенном вентиляторе с 500 точек, что соответствует диаметру 10 см.

Измерения проводились для разных расстояний от сопла с шагом 10 мм (Всего было 8 измерений для 0-70мм)

#### **3.4. Программа эксперимента**

## 1. Подготовка

- Импортировать файл с подготовленными функциями в пустой скрипт измерений  
**import jetFunctions**
- Настроить GPIO 9, 10 и 11 для работы с SPI
- Используя функции из **jetFunctions.py** убедиться, что с АЦП читаются не нули
- Написать цикл, работающий заданное количество шагов
- Собрать усреднённые показания АЦП в теле цикла
- Сохранить собранные усреднённые показания АЦП в файл функцией из стартового набора

## 2. Калибровка

- Получить и сохранить показания АЦП при выключенном вентиляторе (500 точек)
- Измерить давление в струе цифровым манометром с трубкой Пито при включённом вентиляторе (закрыть листком бумаги вход вентилятора, чтобы манометр не зашкаливал)
- Получить и сохранить показания АЦП при измеренном манометром давлении (500 точек)

## 3. Измерения

- Получить и сохранить показания АЦП для сечения на расстоянии 00, 10, 20, 30, 40, 50 ,60 ,70 мм от сопла (500 точек для каждого положения сопла)

# 4. Обработка данных

## 4.1. Центрирование графиков

Центровка графиков происходит следующим образом: строится наиболее близкий с исходным графиком полином при помощи библиотеки `numpy`, определяется значение абсциссы, соответствующей его максимуму, происходит сдвиг исходного графика на это значение.

## 4.2. Вычисление расхода затопленной струи

Расчёт расхода воздуха осуществляется по формуле 3. На основе полученных значений расхода воздуха для различных расстояний от оси сопла строится соответствующий график.



### 4.3. Методика обработки данных

Используя результаты калибровок, программа определяет формулу перевода значений АЦП в давление и формулу перевода количества шагов двигателя в пройденное расстояние. Используя данные уравнения, а так же уравнение Бернулли программа находит скорости воздуха, соответствующие значениям АЦП, и расстояния от трубки Пито до оси сопла. На основе этих данных строятся соответствующие графики.

## 5. Код программы

<https://github.com/yakov7podkova/get-labs/tree/main/laba2/scripts>

## 6. Эксперимент

### 6.1. Калибровка

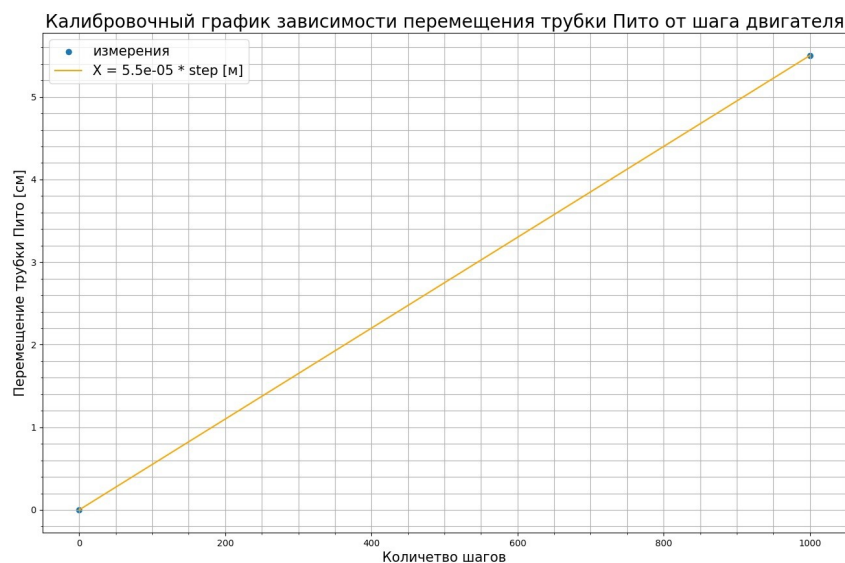


Рисунок 5 - Калибровочный график зависимости перемещения трубки от шага двигателя

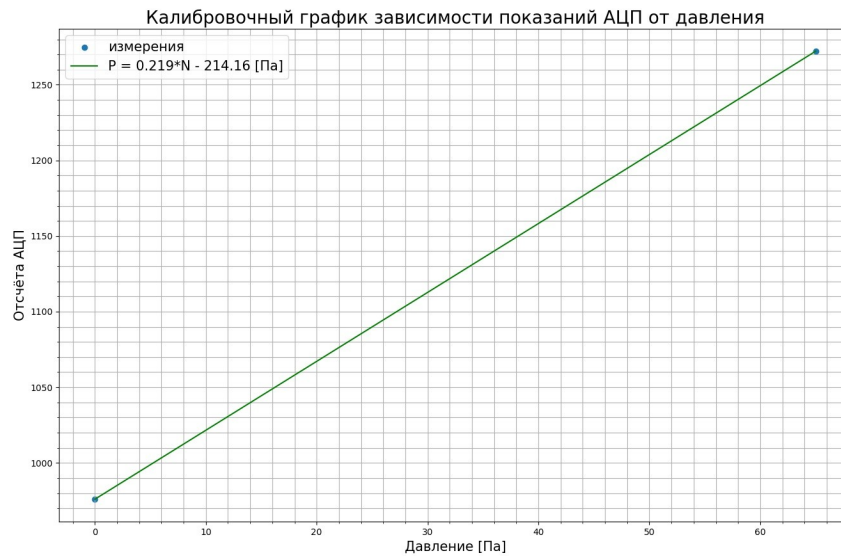


Рисунок 6 - Калибровочный график зависимости показаний АЦП от давления

## 6.2. Графики скорости потока воздуха по сечениям

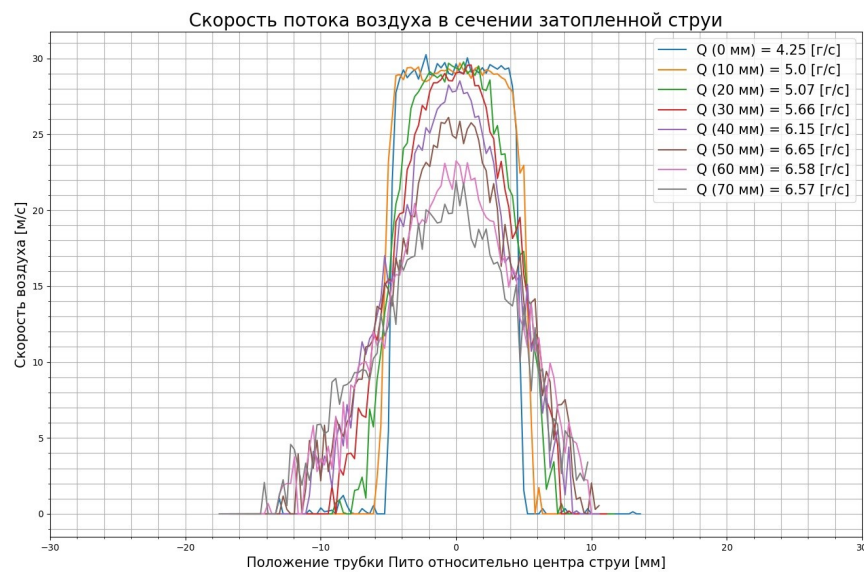


Рисунок 7 - Скорость потока воздуха в сечении затопленной струи

## 6.3. График зависимости расхода от расстояния до сопла

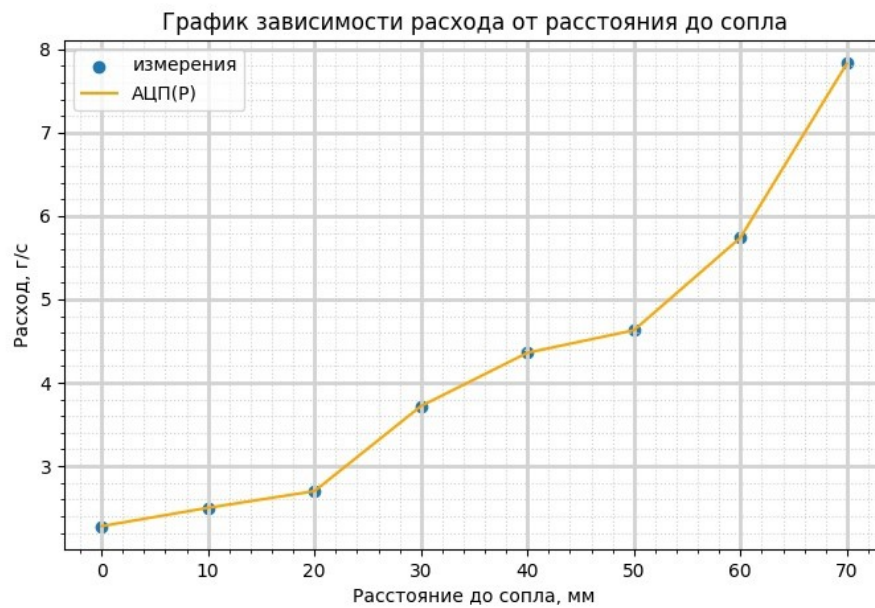


Рисунок 8 - График зависимости расхода от расстояния до сопла

## 7. Итоги лабораторной работы

В результате проведения эксперимента была получена зависимость скорости потока воздуха от расстояния до оси сопла на разных расстояниях между датчиком и соплом. На основе этого были построены графики, описывающие форму потока воздуха. Интегрированием данной зависимости получена зависимость расхода воздуха от расстояния до сопла.