

**МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)**

Физтех-школа аэрокосмических технологий

Кафедра прикладной механики

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА**

по курсу «Общеинженерная подготовка»

**ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ**

**Исполнители:**

Экспериментатор: Блинов П.Г

Программист: Мельников А.Н, Варлевский А.С

Руководитель: Погосян Г.С.

**Преподаватель: Потылицын И.Ю**

**Дата выполнения: 18 ноября 2024 года**

**Оценка:** \_\_\_\_\_

Москва 2024

# 1 ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

**Цель работы:** Экспериментальное исследование затопленной струи воздуха и определение изменения массового расхода вдоль струи с использованием современных средств измерений и обработки данных.

**Основные задачи:**

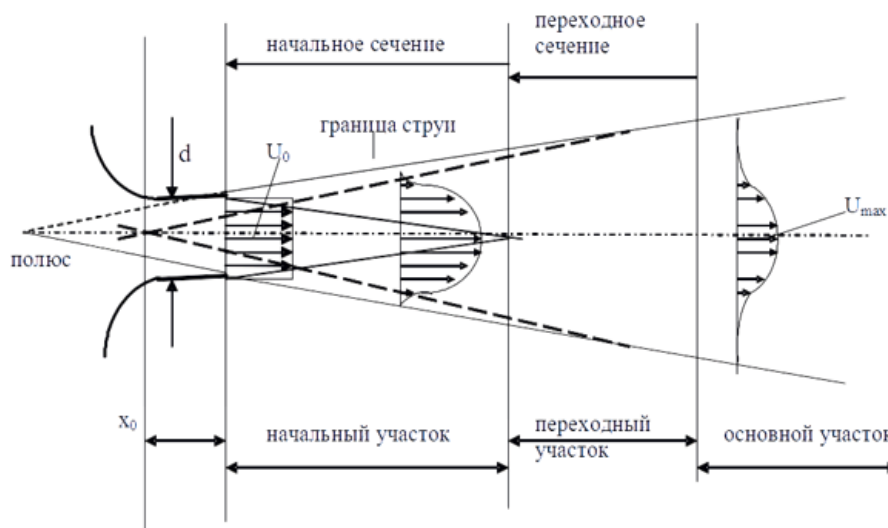
1. Провести калибровку датчика давления и шагового двигателя
2. Измерить профили скорости в восьми сечениях струи на расстояниях 0-70 мм от среза сопла
3. Рассчитать массовый расход в каждом сечении по экспериментальным данным
4. Проанализировать изменение расхода вдоль струи и объяснить наблюдаемые закономерности

## 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

### 2.1 Понятие затопленной 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. В данной работе исследуется струя воздуха, истекающая в покоящийся воздух.

**Опишем 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 рис. 1:



*Рисунок 1: Структура струи.*

## 2.2 Структура струи

Течение в затопленной струе можно разбить на три характерных участка:

- **Начальный участок** — скорость на оси струи не изменяется
- **Переходный участок** — скорость на оси начинает уменьшаться
- **Основной участок** — течение зависит только от потока импульса

## 2.3 Граница струи и явление перемежаемости

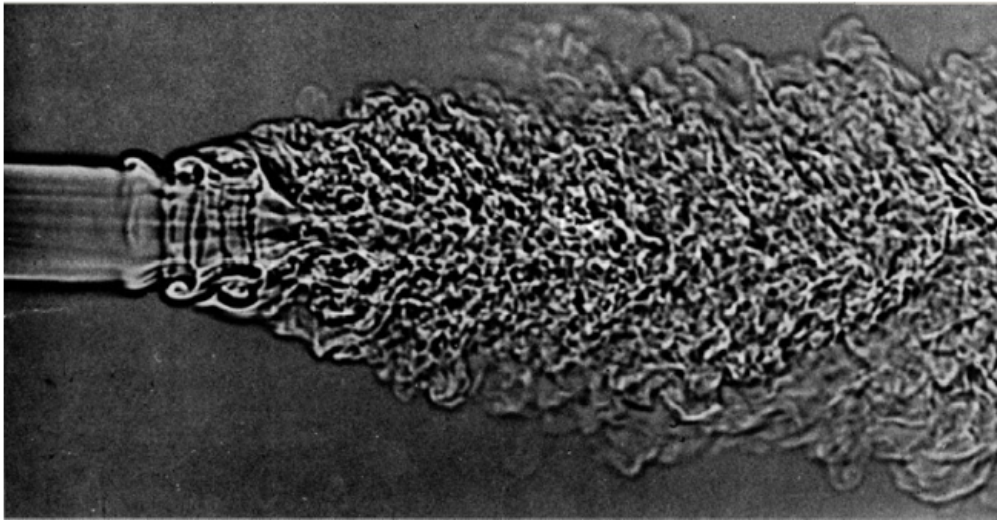
Граница струи определяется как поверхность, где измеренная скорость становится меньше точности измерений. В приграничной области наблюдается **явление перемежаемости** — чередование областей с различной структурой пульсационного движения.

**Ключевые эффекты на границе струи:**

- **Перемешивание** за счёт вязкости и турбулентных пульсаций
- **Обмен количеством движения** между струёй и окружающей средой
- **Подтормаживание** и расширение струи
- **Увлечение** части внешней жидкости

## Результаты:

- Расход струи **увеличивается** вдоль её длины
- Давление сохраняется **постоянным**
- Количество движения практически **не изменяется**



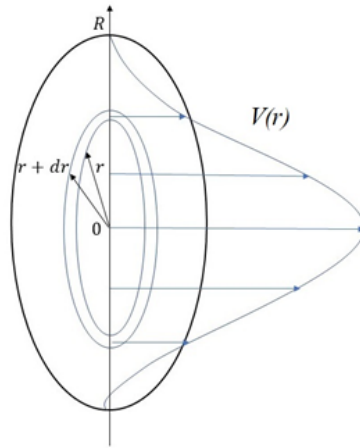
*Рисунок 2: Мгновенная фотография струи углекислого газа, истекающего из канала диаметром 6.5 мм со скоростью 39 м/с.*

## 2.4 Основные расчетные соотношения

Скорость потока определяется по формуле Бернулли:

$$V = \sqrt{\frac{2(P_0 - P)}{\rho}} \quad (1)$$

где  $P_0$  — полное давление,  $P$  — статическое давление,  $\rho = 1.2 \text{ кг/м}^3$  — плотность воздуха.



*Рисунок 4: Схематическое изображение профиля скорости в струе*

Объёмный расход вычисляется интегрированием:

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

Для дискретных данных используется метод трапеций:

$$Q = \pi \sum_{i=1}^{N-1} (V_i r_i + V_{i+1} r_{i+1})(r_{i+1} - r_i) \quad (3)$$

Массовый расход определяется как:

$$G = \rho Q \quad (4)$$

## 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 3.1 Описание установки

Экспериментальная установка включает следующие основные элементы:

- Сопло для формирования воздушной струи
- Трубку Пито с шаговым двигателем для поперечного перемещения
- Датчик давления с АЦП
- Усилитель напряжения

- Компьютер с системой сбора данных
- Цифровой манометр для калибровки

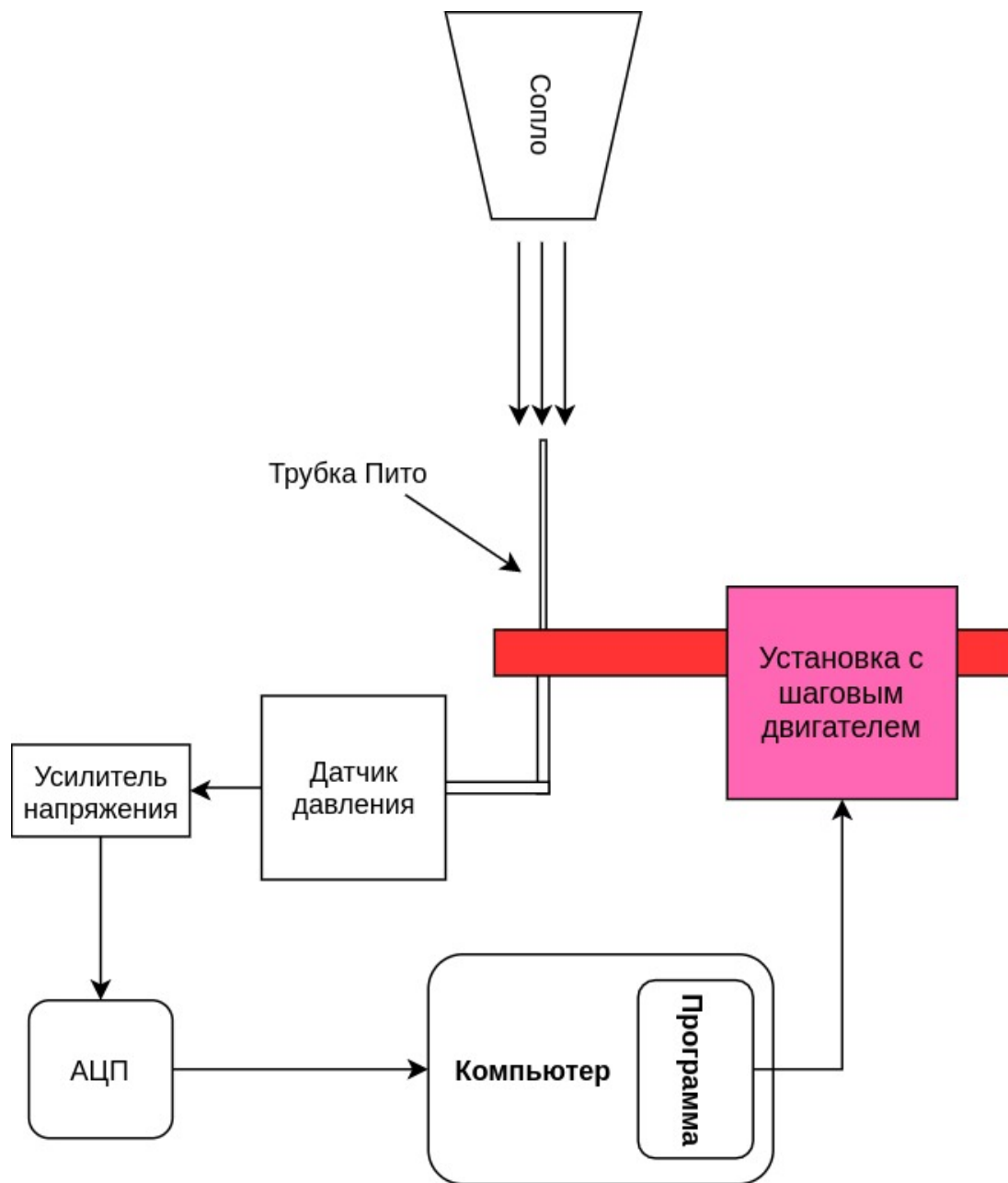


Рис. 1: Схема экспериментальной установки: 1 - трубка Пито, 2 - усилитель напряжения, 3 - датчик давления, 4 - АЦП, 5 - компьютер, 6 - установка с шаговым двигателем, 7 - программа управления



Рис. 2: Фотография экспериментальной установки с цифровым манометром

## **3.2 Программа и методика измерений**

### **3.2.1 Калибровочные измерения**

1. Калибровка датчика давления: 500 точек при выключенном вентиляторе (ноль) и 500 точек при известном давлении
2. Калибровка шагового двигателя: определение коэффициента перемещения трубки Пито

### **3.2.2 Основные измерения**

Измерение поля скоростей в 8 сечениях на расстоянии 0-70 мм от среза сопла с шагом 10 мм. В каждом сечении проведено 100 измерений с последующим усреднением для уменьшения погрешности.

## **3.3 Методика обработки данных**

1. Пересчет показаний АЦП в давление по калибровочной зависимости
2. Расчет скорости по уравнению Бернулли (1)
3. Построение профилей скорости в каждом сечении
4. Центрирование профилей скорости относительно оси струи
5. Расчет расхода методом трапеций (3)
6. Построение графиков зависимости расхода от расстояния

## **4 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ**

### **4.1 Калибровка измерительной системы**

На Рис. 3 представлены результаты калибровки датчика давления. По графику видна линейная зависимость между показаниями АЦП и давлением, что подтверждает корректность работы измерительной системы.



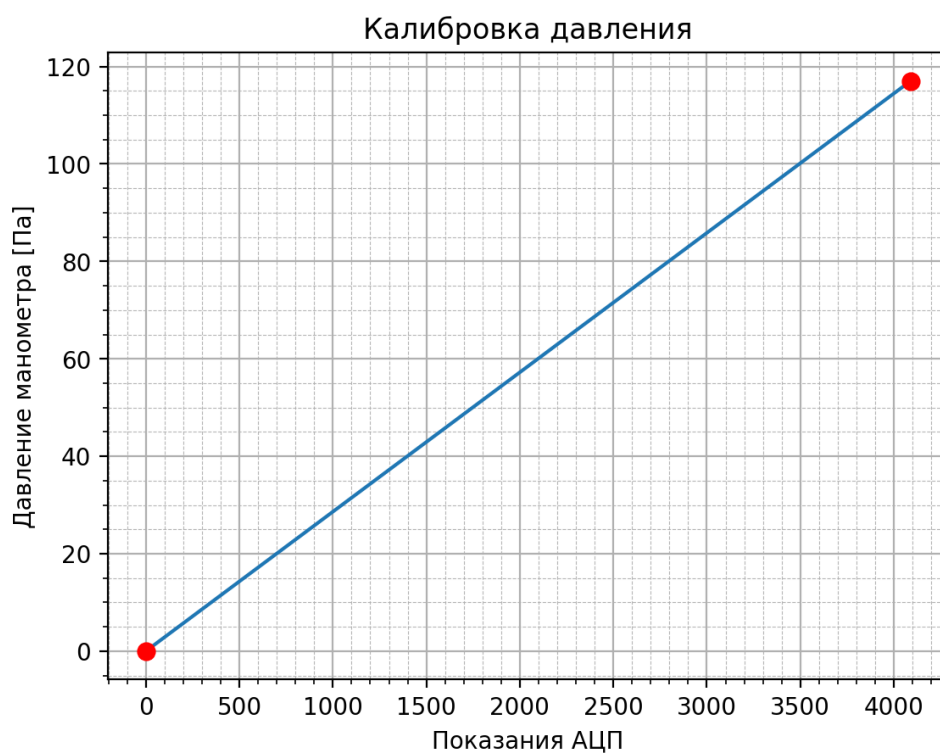


Рис. 3: График калибровки датчика давления

На Рис. 4 показаны результаты калибровки шагового двигателя. График демонстрирует линейный характер перемещения трубки Пито, что обеспечивает точность позиционирования при измерениях.



Рис. 4: График калибровки шагового двигателя

## 4.2 Профили скорости и расход в сечениях струи

На Рис. 5 представлены профили скорости воздуха в различных сечениях затопленной струи и рассчитанные значения массового расхода.

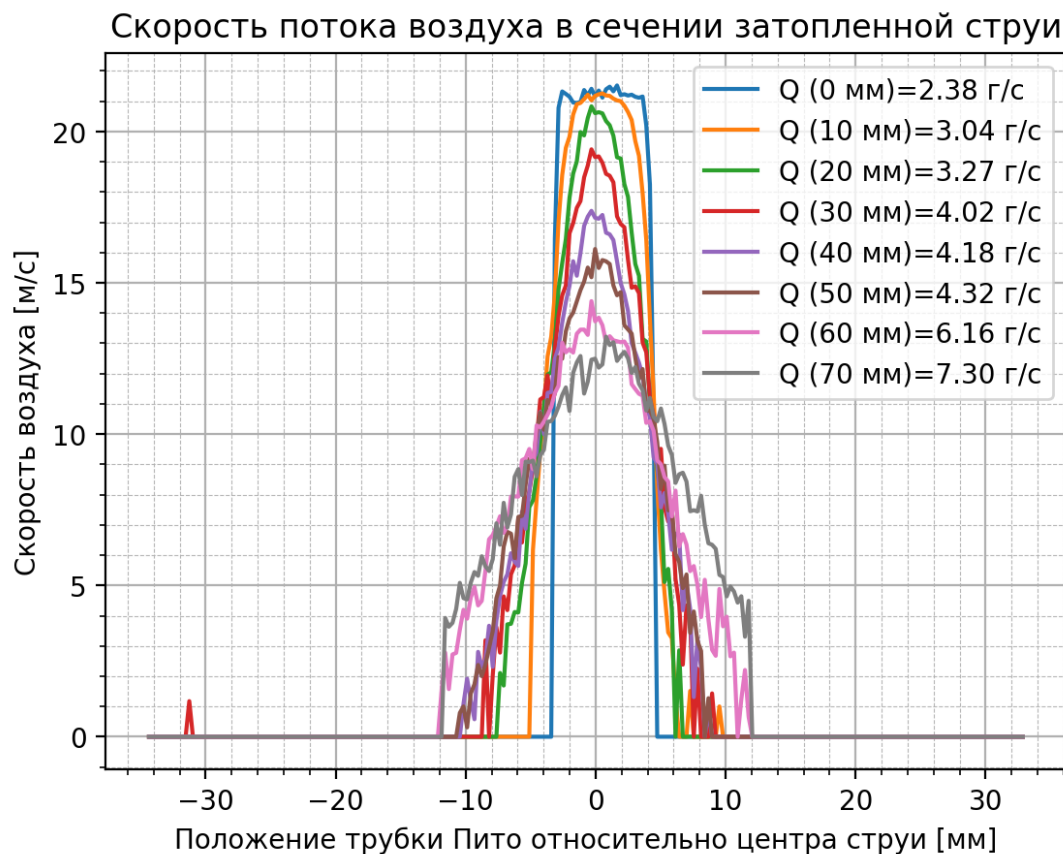


Рис. 5: Профили скорости и расход в сечениях струи

Анализ графиков позволяет сделать следующие наблюдения:

- Все профили скорости являются осесимметричными и имеют характерную колоколообразную форму
- По мере удаления от среза сопла происходит расширение струи, что проявляется в увеличении ширины профилей скорости
- Максимальная (осевая) скорость потока уменьшается с расстоянием

## 4.3 Анализ изменения расхода

Значения массового расхода в различных сечениях струи представлены в Таблице

1.

Таблица 1: Массовый расход в сечениях струи

Расстояние от сопла, мм	Массовый расход, г/с	Относительное увеличение
0	2.38	1.00
10	3.04	1.28
20	3.27	1.37
30	4.02	1.69
40	4.18	1.76
50	4.32	1.82
60	6.16	2.59
70	7.30	3.07

Наблюдается **монотонный рост расхода** вдоль струи: от 2.38 г/с на срезе сопла до 7.30 г/с на расстоянии 70 мм. Увеличение расхода составляет **3.07 раза**.

## 5 ВЫВОДЫ

1. Проведена успешная калибровка измерительной системы. Графики калибровки демонстрируют линейные зависимости, что подтверждает точность измерений.
2. Измерены профили скорости в восьми сечениях затопленной струи. Все профили имеют характерную колоколообразную форму и демонстрируют расширение струи с расстоянием от сопла.
3. Рассчитан массовый расход в каждом сечении. Наблюдается монотонный рост расхода вдоль струи от 2.38 г/с до 7.30 г/с.
4. Увеличение расхода в 3.07 раза на участке 70 мм подтверждает эффект **энтропийного** — увлечения окружающего покоящегося воздуха движущейся струей за счет турбулентного перемешивания.
5. Полученные результаты качественно согласуются с теоретическими представлениями о поведении затопленных струй и демонстрируют основное свойство свободных струй — способность увлекать окружающую среду.

## ОТВЕТЫ НА КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. **Какие законы физики выполняются при описании затопленной струи?**

Законы сохранения массы, импульса и энергии (уравнение Бернулли).

**2. Может ли увеличиваться расход при сохранении импульса?**

Да, может. Увеличение расхода происходит за счёт увлечения окружающей среды, при этом суммарный импульс сохраняется.

**3. Написать формулу для оценки расхода на срезе сопла.**

Для плоского профиля скорости на срезе сопла:

$$Q_0 = V_0 \cdot \frac{\pi d^2}{4}$$

**4. Какова структура затопленной струи?**

Затопленная струя имеет трёхчастную структуру: начальный участок, переходный участок и основной участок.

**5. Как изменяется профиль скорости в зависимости от участка струи?**

На начальном участке профиль скорости близок к прямоугольному, на основном участке — приобретает колоколообразную форму с уменьшающейся осевой скоростью.