

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа аэрокосмических технологий

Кафедра прикладной механики

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

по курсу «Общееинженерная 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: _____

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:

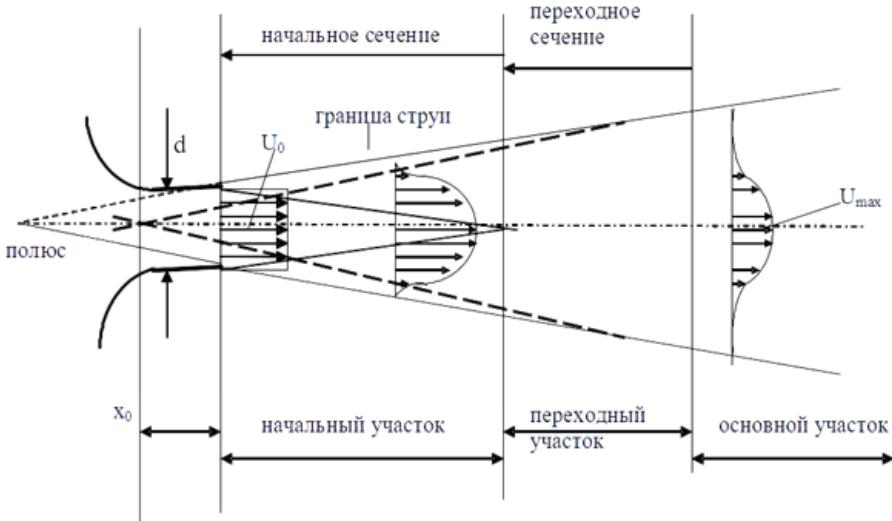


Рисунок 1: Структура струи.

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**

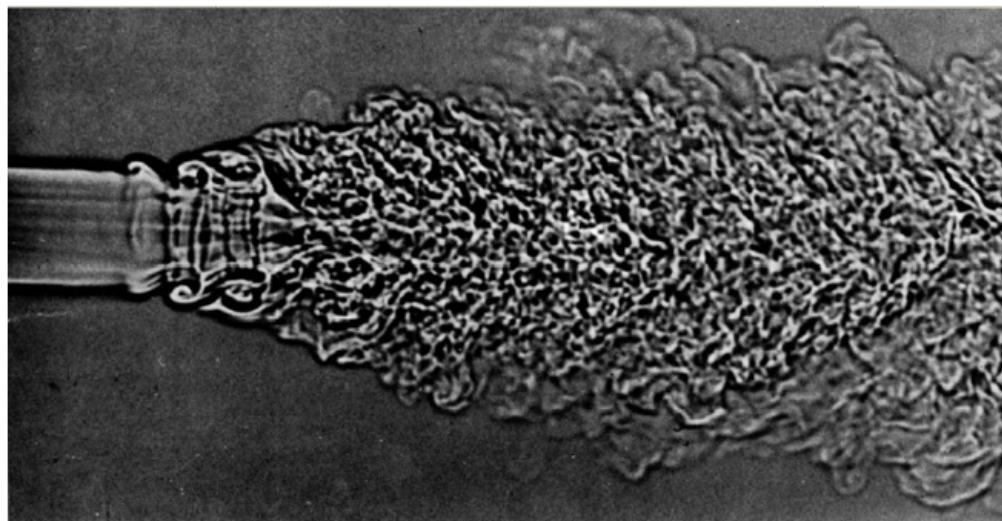


Рисунок 2: Мгновенная фотография струи углекислого газа, истекающего из канала диаметром 6.5 мм со скоростью 39 м/с.

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, $\rho = 1.2 \text{ кг}/\text{м}^3$ — плотность воздуха.

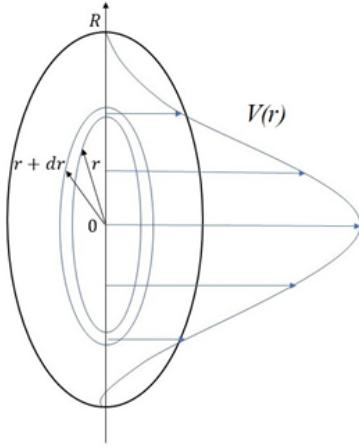


Рисунок 4: Схематическое изображение профиля скорости в струе

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

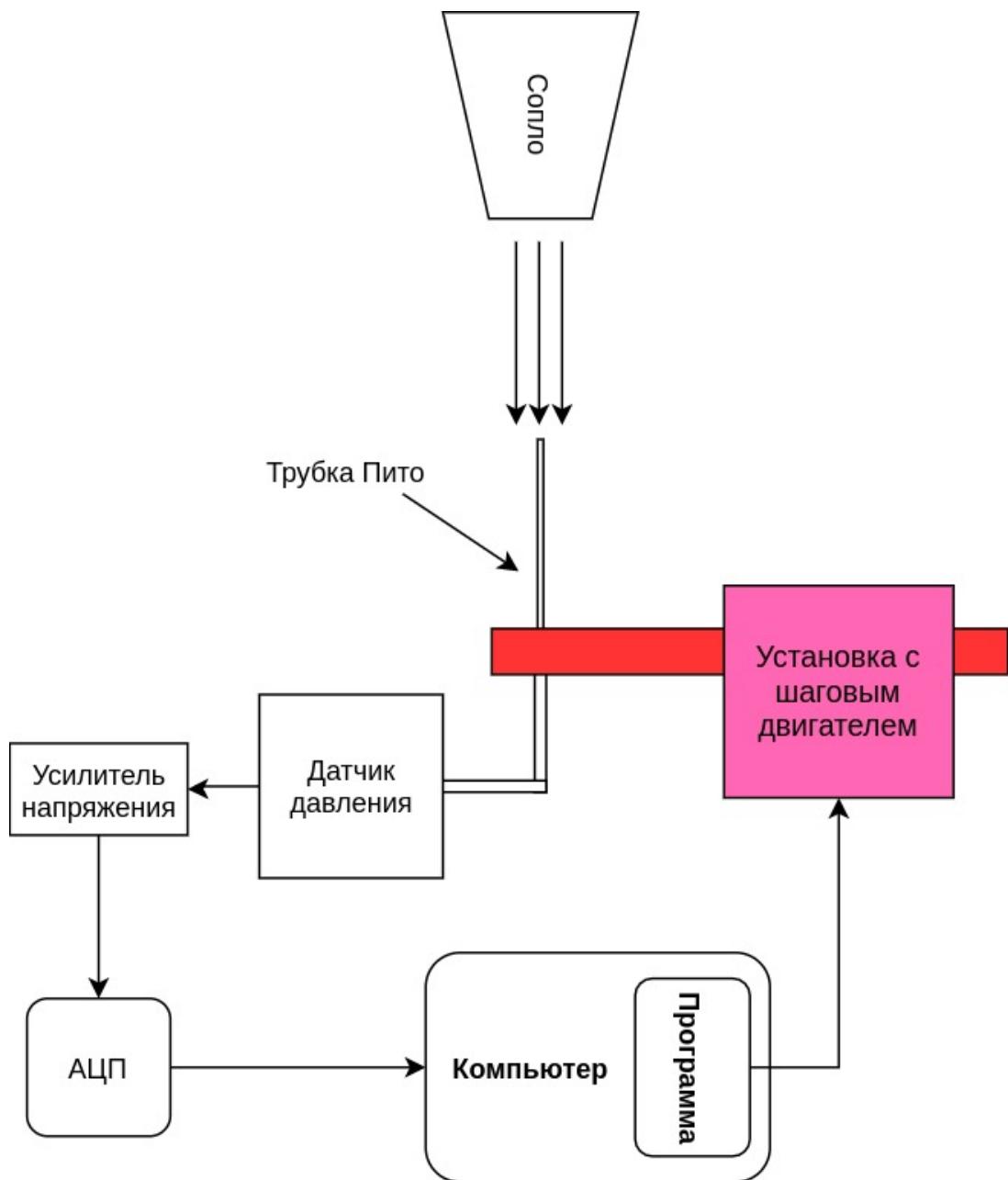


Рис. 1: Схема экспериментальной установки: 1 - трубка Пито, 2 - усилитель напряжения, 3 - датчик давления, 4 - АЦП, 5 - компьютер, 6 - установка с шаговым двигателем, 7 - программа управления



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 трубы 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.

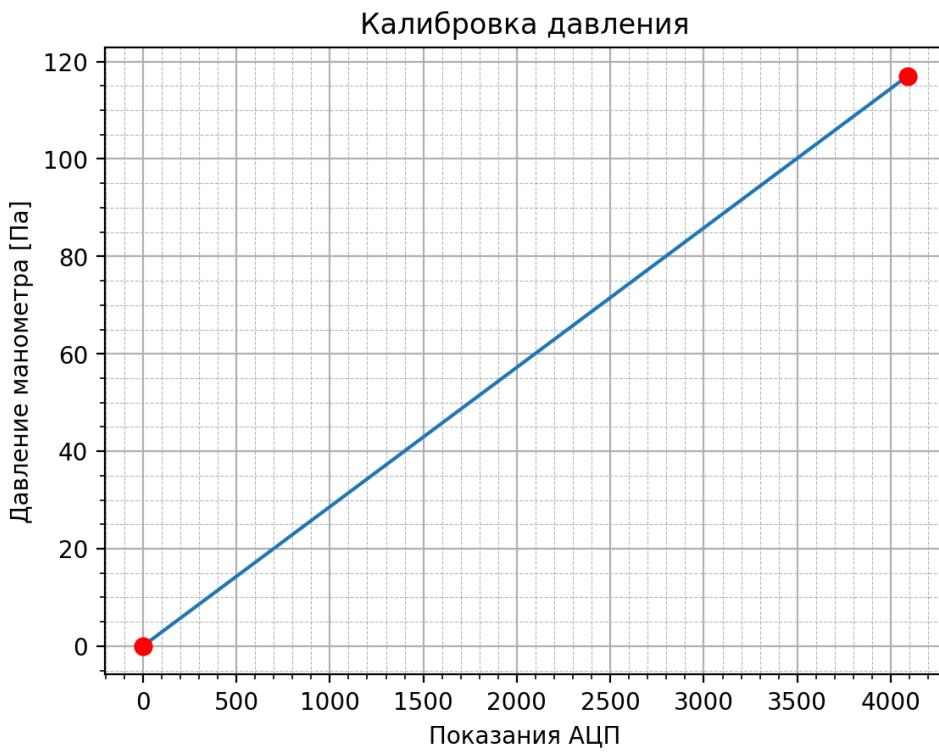


Рис. 3: График калибровки датчика давления

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

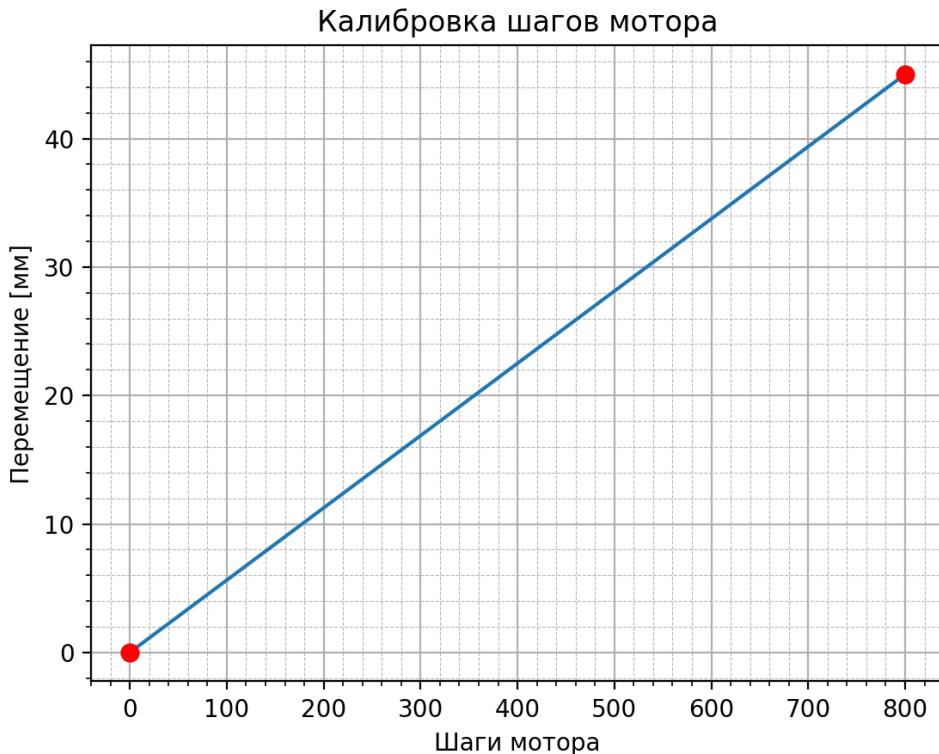


Рис. 4: График калибровки шагового двигателя

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.

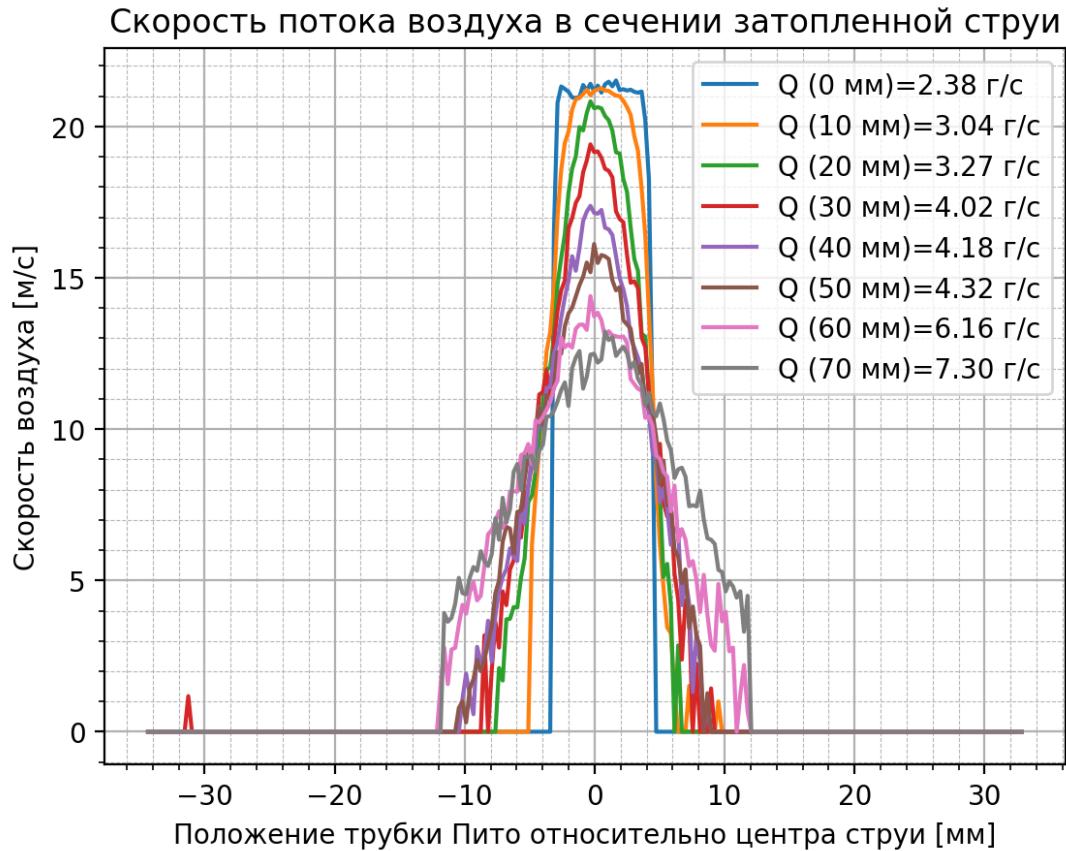


Рис. 5: Профили скорости и расход в сечениях струи

Анализ графиков позволяет сделать следующие наблюдения:

- Все профили скорости являются осесимметричными и имеют характерную колокообразную 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

- Проведена успешная калибровка измерительной системы. Графики калибровки демонстрируют линейные зависимости, что подтверждает точность измерений.
- Измерены профили скорости в восьми сечениях затопленной струи. Все профили имеют характерную колоколообразную форму и демонстрируют расширение струи с расстоянием от сопла.
- Рассчитан массовый расход в каждом сечении. Наблюдается монотонный рост расхода вдоль струи от 2.38 г/с до 7.30 г/с.
- Увеличение расхода в 3.07 раза на участке 70 мм подтверждает эффект **энтрэймента** — увлечения окружающего покоящегося воздуха движущейся струей за счет турбулентного перемешивания.
- 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

- 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.