

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
ФАКУЛЬТЕТ ОБЩЕЙ И ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ

Лабораторная работа № 1.3.3  
**Измерение вязкости воздуха по течению в тонких трубках**

Выполнил студент группы Б02-202  
Сулимов Марк

Долгопрудный, 2023 г.

# 1 Аннотация

Работа посвящена исследованию истечения воздуха через трубки малого диаметра. Измерялась зависимость разности давлений в трубе от расхода воздуха для трубок диаметром 3.95 мм и 5.05 мм. В результате были получены оценки критического числа Рейнольдса  $\eta \approx 14,6 \pm 1,8 \text{ мкПа} \cdot \text{с}$ , определена вязкость воздуха и проверена справедливость решения Пуазейля.

# 2 Введение

Согласно модели идеального газа, молекулы, входящие в состав воздуха, не должны взаимодействовать между собой, в таком случае газ должен был бы течь по трубе без трения, в противном же случае, и при маленьких числах Рейнольдса, будет справедливо решение Пуазейля [1].

Определение численного значения вязкости воздуха необходимо, например, для проектирования летательных аппаратов. Несмотря на то, что в работе исследуется воздух при низких скоростях, проводить аналогичные описанным измерения можно и при больших скоростях газа.

Согласно уравнению Пуазейля расход газа определяется [1] как

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8 \eta l},$$

где  $R$  - радиус трубы,  $\Delta P$  - измерение давления на исследуемом участке,  $\eta$  - вязкость жидкости,  $l$  - длина участка.

Таким образом, если течение воздуха ламинарное, зависимость расхода от разности давлений - линейная с угловым коэффициентом, зависящим от геометрии системы и вязкости газа. На этом основан метод измерения вязкости.

# 3 Методика измерений

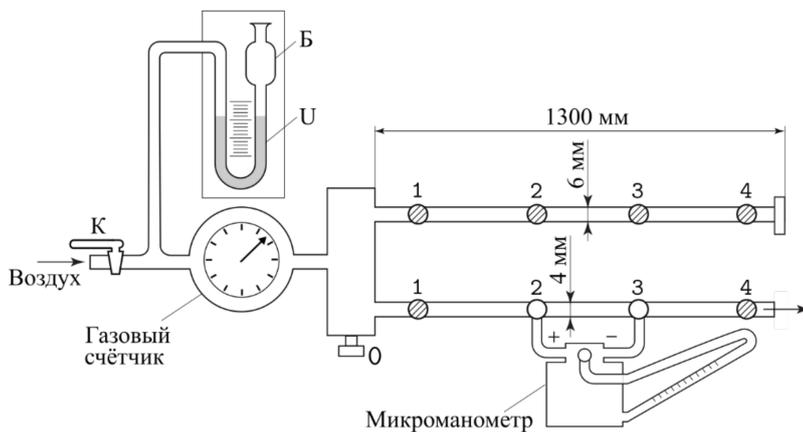


Рис. 1: Схема установки

Установка показанная на рис.1 состоит из металлической трубы, соединённой с компрессором и счетчиком для измерения расхода, с несколькими клапанами, к которым подсоединяется подсоединить манометр.

В ходе эксперимента манометр подключался к паре клапанов, измерялась зависимость падения давления на исследуемом участке в зависимости от расхода нагнетаемого воздуха. Измерения были проведены для трубок диаметром 3.95 мм и 5.05 мм для участков 50 см и 90 см соответственно.

Так как решение Пуазейля описывает только ламинарное течение газа, измерения нужно проводить при маленьких числах Рейнольдса. Для определения ламинарного и турбулентного течений измерения проводились в больших диапазонах расхода воздуха.

Расход определялся, так что бы ошибка времени реакции человека была много меньше измеряемой величины, тогда погрешностью измерения расхода можно пренебречь по сравнению с ошибкой измерения давления, равной цене деления манометра. Полученные данные можно найти в приложении А.

## 4 Обсуждение результатов

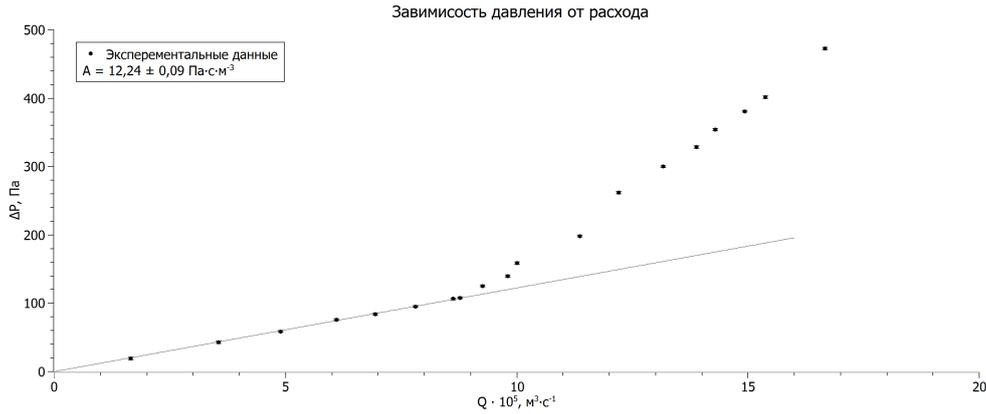


Рис. 2: Зависимость давления от расхода для участка трубы диаметром 3.95 мм, длиной 50 см

Из рисунка 4 можно получить угол наклона аппроксимирующей прямой и вычислить вязкость воздуха,  $\eta = 13,7 \pm 1,2 \text{ мкПа}\cdot\text{с}$ . Видно, что изменение режима течения происходит при давлении порядка 106 Па и расходе  $8,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ , что соответствует  $Re \approx 2500$ .

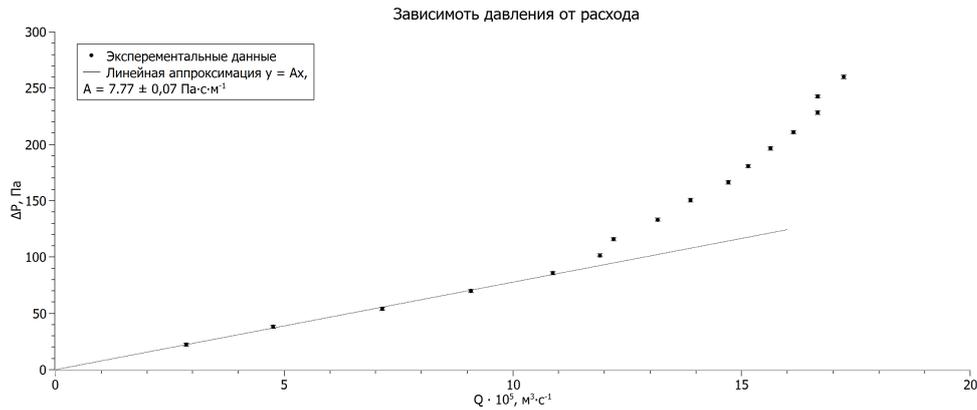


Рис. 3: Зависимость давления от расхода для участка трубы диаметром 3.95 мм, длиной 50 см

Аналогично для трубы диаметром 5,05 мм (рисунок 4):  $\eta = 14,6 \pm 1,8 \text{ мкПа}\cdot\text{с}$ . Изменение режима при давлении порядка 86 Па и расходе  $10,87 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ , что соответствует  $Re \approx 2200$ .

Таким образом при числах Рейнольдса меньших 2000 зависимость давления от расхода линейная, что подтверждает формулу Пуазейля. Заметим также, что и при турбулентном течении, зависимость давления от расхода хорошо описывается линейной функцией, однако при таком режиме течения давление не стабильно, а флуктуирует вокруг среднего значения, что сильно повышает погрешность измерения, в данной работе это не было учтено, и замечание о линейном характере зависимости может быть следствием низкой точности измерений.

## 5 Выводы

В ходе работы было подтверждено, что зависимость давления от расхода при числах Рейнольдса меньших 2000 является линейной, что согласуется с теоретическими предсказаниями. Обнаружена линейная зависимость и в турбулентном режиме течения, что противоречит модели описанной в [1]. Что указывает на необходимость дальнейших исследований.

## Список литературы

- [1] П. Попов В. Измерение вязкости воздуха по течению в тонких трубках. URL:  
[https://mipt.ru/education/chair/physics/S\\_I/lab/133.pdf](https://mipt.ru/education/chair/physics/S_I/lab/133.pdf).

## А Экспериментальные данные

В приложении приведены таблицы и измеренными значениями.

$Q \cdot 10^5 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$	Р Па	$\sigma_P$
3,55	42,84	1,58
4,90	58,70	1,58
6,10	76,16	1,58
7,81	95,20	1,58
8,62	106,30	1,58
1,66	19,04	1,58
6,94	84,09	1,58
8,77	107,89	1,58
9,26	125,34	1,58
9,80	139,62	1,58
10,00	158,66	1,58
11,36	198,33	1,58
12,20	261,79	1,58
13,16	299,87	1,58
13,89	328,43	1,58
14,29	353,82	1,58
14,93	380,79	1,58
15,38	401,41	1,58
16,67	472,81	1,58

Таблица 1: Зависимость давления Р от расхода Q, при истечении из трубы диаметром 3.95 мм на участке длиной 50 см,  $\sigma_P$  - погрешность определения давления

$Q \cdot 10^5 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$	Р Па	$\sigma_P$
2,86	22,21	1,58
7,14	53,95	1,58
10,87	85,68	1,58
12,20	115,82	1,58
13,89	150,73	1,58
15,15	180,87	1,58
16,13	211,02	1,58
16,67	242,75	1,58
4,76	38,08	1,58
9,09	69,81	1,58
11,90	101,54	1,58
13,16	133,28	1,58
14,71	166,60	1,58
15,63	196,74	1,58
16,67	228,47	1,58
17,24	260,21	1,58

Таблица 2: Зависимость давления Р от расхода Q, при истечении из трубы диаметром 5.05 мм на участке длиной 90 см,  $\sigma_P$  - погрешность определения давления