

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

Лабораторная работа № 1.3.3  
**Определение вязкости воздуха по скорости течения через  
трубку**

Серебренников Даниил  
Группа Б02-826

Долгопрудный, 2019 г.

**Цель работы:** Экспериментально выявить участок сформированного течения, определить режимы ламинарного и турбулентного течения; определить число Рейнольдса.

**В работе используется:** Металлические трубки, укрепленные на горизонтальной подставке; газовый счетчик; микроманометр типа ММН; стеклянная U-образная трубка; секундомер.

## Теоретическая часть

Рассмотрим движение вязкой жидкости или газа по трубке круглого сечения. При малых скоростях потока движение оказывается ламинарным (слоистым), скорости частиц меняются по радиусу и направлены вдоль оси трубки. С увеличением скорости потока движение становится турбулентным, и слои перемешиваются. При турбулентном движении скорость в каждой точке быстро меняет величину и направление, сохраняется только средняя величина скорости.

Характер движения газа (или жидкости) в трубке определяется безразмерным числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{vr\rho}{\eta}. \quad (1)$$

В гладких трубках круглого сечения переход от ламинарного движения к турбулентному происходит при  $Re \approx 1000$ . При ламинарном течении объем газа  $V$ , протекающий за время  $t$  по трубе длиной  $l$  (называемый расходом), определяется формулой Пуазейля:

$$Q_V = \frac{\pi r^4}{8l\eta} \Delta P. \quad (2)$$

При втекании газа в трубку из большого резервуара скорости слоев вначале постоянны по всему сечению (рис. 1).

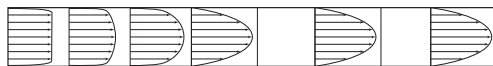


Рис. 1: Формирование потока газа в трубке круглого сечения.

По мере продвижения газа по трубке картина распределения скоростей меняется, так как сила трения о стенку тормозит прилежащие к ней слои. Характерное для ламинарного течения параболическое распределение скоростей устанавливается на некотором расстоянии  $a$  от входа в трубку, которое зависит от радиуса трубки  $r$  и числа Рейнольдса по формуле:

$$a \approx 0,2r \cdot Re \quad (3)$$

## Экспериментальная установка

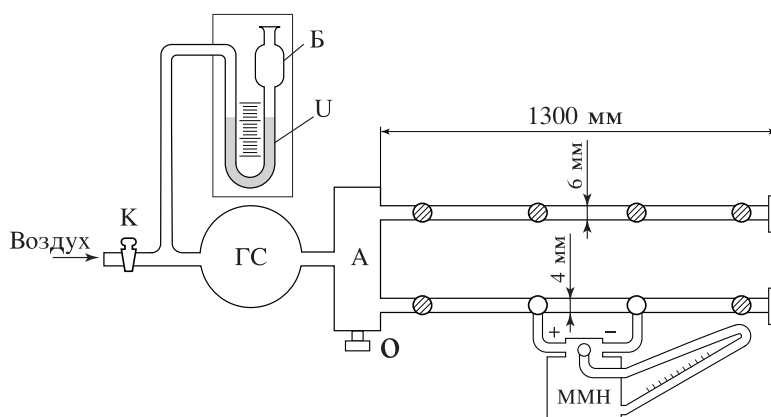


Рис. 2: Схема установки для определения вязкости воздуха.

## Экспериментальные данные

По формуле (3) оценим расстояние, на котором происходит формирование потока при ламинарном течении ( $Re = 1000$ ):  $a \approx 40$  см.

Снимем зависимость разности давлений  $\Delta P$  на крайнем участке длиной  $l = 50$  см трубы диаметром  $d = 3,955$  мм от расхода воздуха  $Q = \Delta V / \Delta$ . Результаты измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1: Результаты измерений.

$Q$ , мл/с	$\sigma_Q$ , мл/с	$h$ , мм	$\Delta P$ , Па	$\sigma_{\Delta P}$ , Па
23,2	0,3	21	41	2
34,4	0,5	31	61	2
58,7	0,9	50	98	2
86,8	1,3	73	143	2
92,8	1,4	87	171	2
100,1	1,5	111	218	2

По полученным данным построим график (рис. 3)  $\Delta P = f(Q)$ , причем из формулы (2) видно, что при ламинарном потоке зависимость  $\Delta P$  от  $Q$  должна быть линейной. При возникновении турбулентности линейность графика нарушается: разность давлений растет быстрее, чем расход.

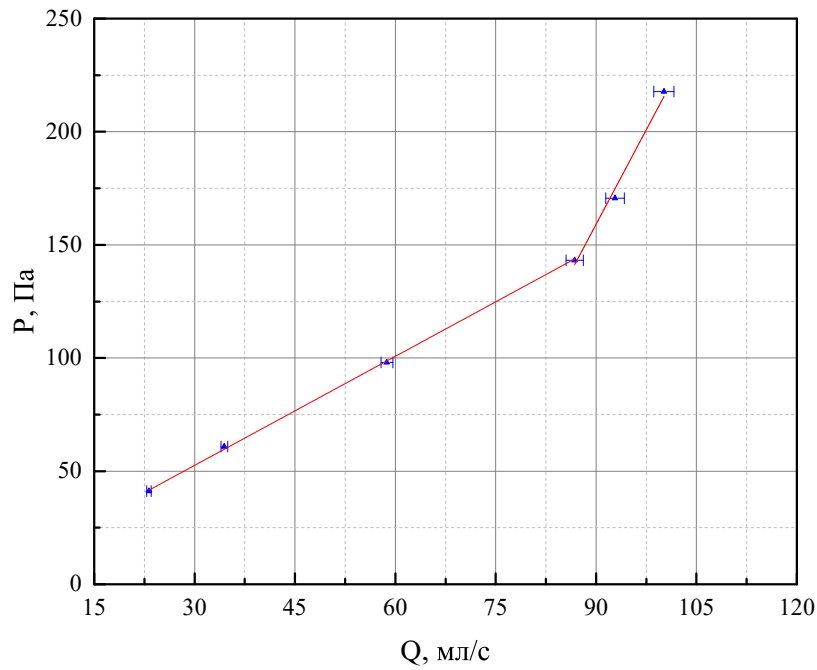


Рис. 3: График зависимости  $\Delta P = f(Q)$ .

Нетрудно заметить, что при расходе  $Q = 86,8$  мл/с нарушается линейность, значит, появляется турбулентность. По угловому коэффициенту линейного графика ( $Q < 86,8$ ) определим вязкость воздуха:

$$\eta = (16,1 \pm 0,3) \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

Для переходной области рассчитаем значение числа Рейнольдса ( $Q = 86,8$  мл/с) по формуле (1) с учётом  $Q = vS$ :

$$Re = 1040 \pm 30$$

При расходе, заведомо обеспечивающем ламинарность потока ( $Q \approx 30$  мл/с), снимем зависимость давления  $\Delta P$  вдоль трубки от длины  $l$  (длина измеряется от конца трубки). В таблице 2 представлены результаты измерений.

Таблица 2: Результаты измерений.

$l$ , см	50	90	120	131,5
$\Delta P$ , Па	51	92	122	151

Построим график (рис. 4) зависимости давления от длины вдоль трубки  $\Delta P = f(l)$ .

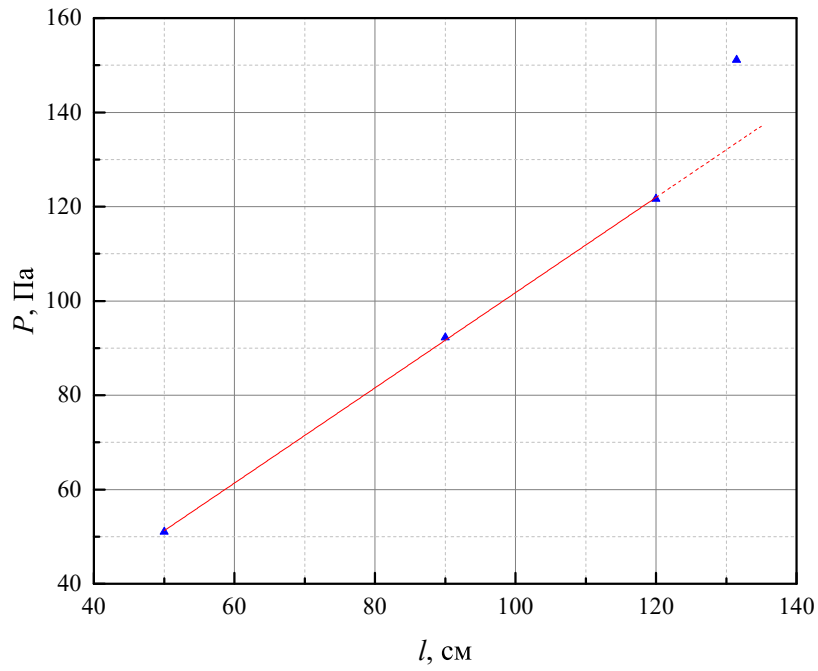


Рис. 4:  $\Delta P = f(l)$ .

Из графика видно, что установление потока происходит уже на 1-ом участке длиной 11,5 см. Значит, оценка, полученная по формуле (3), является достаточно грубой.

Для обеих трубок на участках со сформированным течением (в конце трубок) в ламинарном режиме ( $\text{Re} < 500$ ) снимем зависимость  $Q = f(P)$ . По полученным данным (табл. 3) построим график (рис. 5) зависимости  $\ln \Pi := \ln \frac{8\eta Q}{\pi \Delta P}$  от  $\ln r$ .

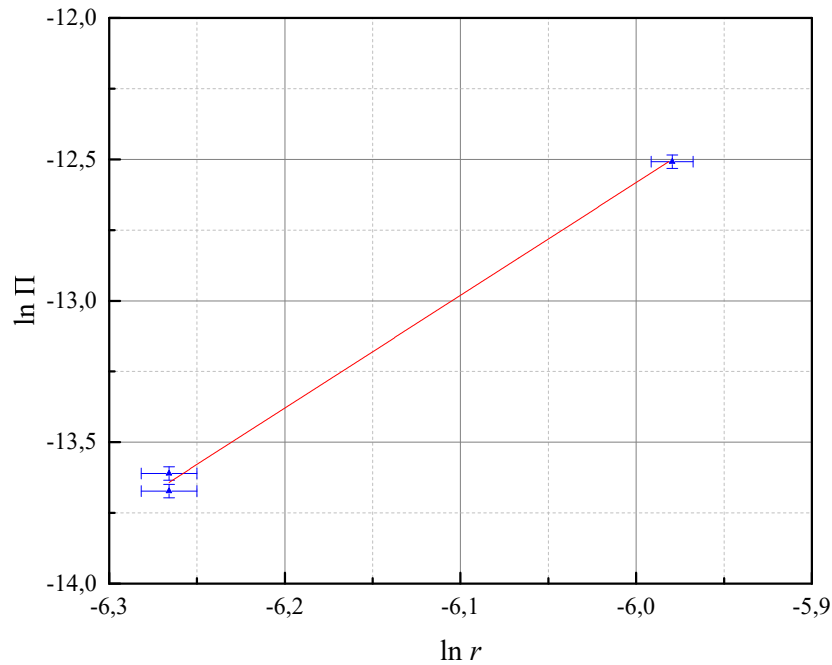


Рис. 5: Зависимость  $\ln \Pi$  от  $\ln r$ .

Таблица 3: Результаты измерений и вычислений.

$r$ , мм	$Q$ , мл/с	$\Delta P$ , Па	$\ln r$	$\sigma_{\ln r}$	$\ln \Pi$	$\sigma_{\ln \Pi}$
1,98	23,2	41	-6,225	0,015	-13,67	0,02
1,98	58,7	98	-6,225	0,015	-13,61	0,02
2,53	70,7	39	-5,980	0,012	-12,51	0,02

По графику определим наклон прямой:

$$n = 3,99 \pm 0,19$$

## Обсуждение результатов

В первую очередь хотелось бы обратиться к технической литературе, чтобы узнать более точную оценку для длины входного участка, нежели формула (3). Длина начального участка, на которой заканчивается стабилизация профиля скорости, очевидно, является условной величиной. Прандтль предложил принять за  $a$  такое расстояние от входа, при котором значение скорости на оси трубы отличается от её стабилизированного значения лишь на 1%. Однако в литературе можно встретить в выражении для  $a$  различные коэффициенты от 0,02 до 0,07 (например формула Буссинеска:  $a = 0,065 Re \cdot d$ ). Это нетрудно объяснить асимптотическим характером процесса стабилизации, зависимостью от геометрии системы и несколькими другими критериями для определения  $a$ . В нашей лабораторной работе можно использовать формулу Шиллера  $a = 0,029 Re \cdot d = 11,5$  см, результат которой точно совпадает с нашим экспериментальным значением.

Мы определили значение динамической вязкости воздуха при нормальных условиях  $\eta = 16,1 \cdot 10^{-6}$  Па·с с относительной погрешностью  $\varepsilon = 1,86\%$ . Полученный результат отличается от табличного  $\eta_0 = 18,4 \cdot 10^{-6}$  Па·с на 12,5%. Расхождение может быть связано с зависимостью вязкости от температуры,

Так же мы экспериментально убедились в справедливости формулы Пуазейля (2). Действительно, полученное значение  $n = 4$  означает, что  $Q \propto r^4$ .

## Выводы

- Вычислили коэффициент динамической вязкости для воздуха при нормальных условиях  $\eta = 16,1 \cdot 10^{-6}$  Па·с.
- Рассчитали длину входного участка  $a = 11,5$  см.
- Установили, что  $Q \propto r^4$ .