

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа электроники, фотоники и молекулярной физики

Лабораторная работа 1.3.3  
Измерение вязкости воздуха по течению в  
тонких трубках

Салтыкова Дарья

Б04-105

# 1 Введение

**Цель работы:** экспериментально исследовать свойства течения газов по тонким трубкам при различных числах Рейнольдса; выявить область применимости закона Пуазейля и с его помощью определить коэффициент вязкости воздуха.

**Оборудование:** система подачи воздуха (компрессор, поводящие трубки); газовый счетчик барабанного типа; спиртовой микроманометр с регулируемым наклоном; набор трубок различного диаметра с выходами для подсоединения микроманометра; секундомер.

## 2 Теоретические сведения

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:

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

где  $u$  - скорость потока,  $a$  - характерный размер системы (размер, на котором существенно меняется скорость течения),  $\rho$  - плотность движущейся среды,  $\eta$  - вязкость. Это число имеет смысл отношения кинетической энергии движения элемента объёма жидкости к потерям энергии из-за трения в нём.  $Re \sim K/A_{тр}$  В гладких трубах 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  $l$ , определяется формулой Пуазейля:

$$Q = \frac{\pi R^4}{8l\eta}(P_1 - P_2) \quad (2)$$

В этой формуле  $P_1 - P_2$  - разность давлений в двух выбранных сечениях 1 и 2, расстояние между которыми равно  $l$ . Величину  $Q$  обычно называют расходом. Формула (2) позволяет определять вязкость газа по его расходу.

Отметим условия, при которых справедлива формула (2). Прежде всего необходимо, чтобы с достаточным запасом выполнялось неравенство  $Re < 1000$ . Необходимо также, чтобы при течении не происходило существенного изменения удельного объема газа (при выводе формулы удельный объем считался постоянным). Для жидкости это предположение выполняется практически всегда, а для газа - лишь в тех случаях, когда перепад давлений вдоль трубки мал по сравнению с самим давлением. В нашем случае давление газа равно атмосферному ( $10^3$  см вод. ст.), а перепад давлений составляет не более 10 см вод. ст., то есть менее 1% от атмосферного. Формула (2) выводится для участков трубки, на которых закон распределения скоростей газа по сечению не меняется при движении вдоль потока.

При втекании газа в трубку из большого резервуара скорости слоев вначале постоянны по всему сечению (рис. 1). 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  $l_{уст}$  от входа в трубку, которое зависит от радиуса трубки  $R$  и числа Рейнольдса по формуле

$$l_{\text{уст}} \approx 0,2R \cdot Re \quad (3)$$

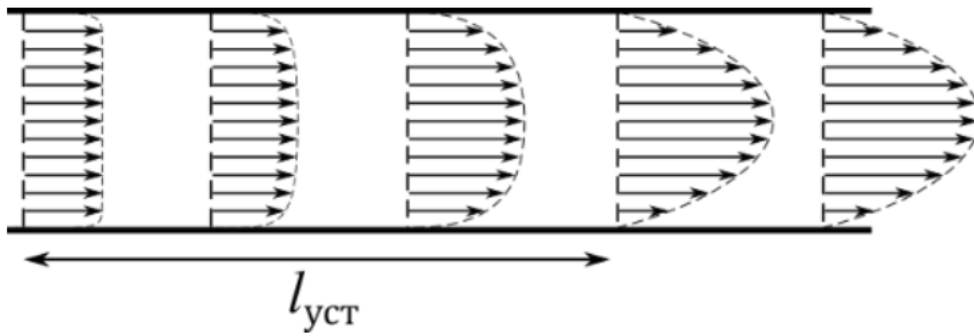


Рис. 1: Формирование установившегося течения (в ламинарном режиме)

Градиент давления на участке формирования потока оказывается большим, чем на участке с установившимся ламинарным течением, что позволяет разделить эти участки экспериментально. Формула (3) дает возможность оценить длину участка формирования.

### 3 Экспериментальная установка

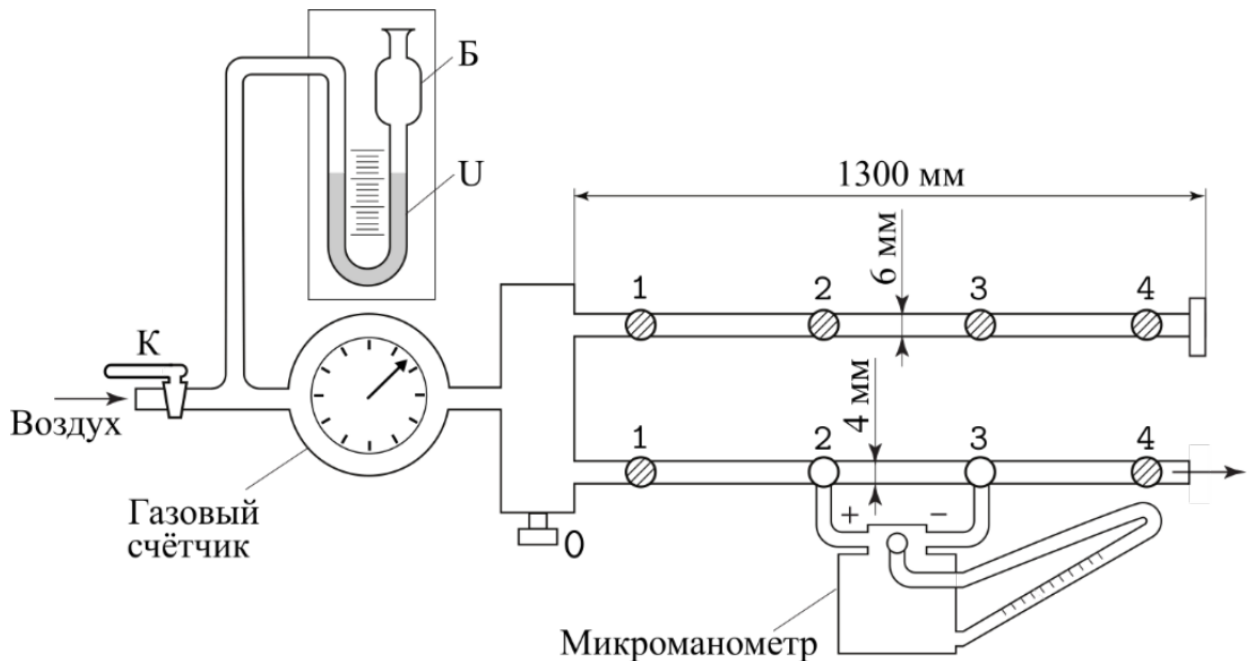


Рис. 2: Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки изображена на Рис. 2. Поток воздуха под давлением, немного превышающим атмосферное, поступает через газовый счётчик в тонкие металлические трубки. Воздух нагнетается компрессором, интенсивность его подачи регулируется краном К. Трубки снабжены съёмными заглушками на концах и рядом миллиметровых отверстий, к которым можно подключать микроманометр. В рабочем состоянии открыта заглушка на одной

(рабочей) трубке, микроманометр подключён к двум её выводам, а все остальные отверстия плотно закрыты пробками.

Перед входом в газовый счётчик установлен водяной U-образный манометр. Он служит для измерения давления газа на входе, а также предохраняет счётчик от выхода из строя. При превышении максимального избыточного давления на входе счётчика ( $\sim 30$  см вод. ст.) вода выплёскивается из трубки в защитный баллон Б, создавая шум и привлекая к себе внимание экспериментатора.

## 4 Ход работы

1. Проведем предварительные расчеты:

1.1 Рассчитаем значение расхода  $Q_{кр}$ , при котором число Рейнольдса станет равным критическому  $Re_{кр} \approx 10^3$ . Для предварительной оценки примем вязкость воздуха равной  $\eta_{возд} \sim 2 \cdot 10^{-5}$  Па·с, плотность воздуха определим по уравнению идеального газа. В качестве характерной скорости потока используем её среднее значение  $\langle u \rangle = \frac{Q}{\pi R^2}$ .

$$Q_{кр} = \langle u \rangle \pi R^2 = \frac{Re_{кр} \eta_{возд} \pi R^2}{\rho l}$$

Для  $d = 3,90 \pm 0,05$  мм

$$Q_{кр} = 4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Для  $d = 5,25 \pm 0,05$  мм

$$Q_{кр} = 7 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Для  $d = 3,00 \pm 0,1$  мм

$$Q_{кр} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}.$$

1.2 По формуле Пуазейля рассчитаем соответствующий перепад давления на выбранном участке  $\Delta P_{кр}$ .

$$\Delta P_{кр} = \frac{8\eta l Q}{\pi R^4}$$

Для  $d = 3,90 \pm 0,05$  мм

$$\Delta P_{кр} = 260 \text{ Па}.$$

Для  $d = 5,25 \pm 0,05$  мм

$$\Delta P_{кр} = 310 \text{ Па}.$$

Для  $d = 3,00 \pm 0,1$  мм

$$\Delta P_{кр} = 200 \text{ Па}.$$

1.3 Оценим длину  $l_{уст}$ , на которой течение можно считать установившимся при  $Re \approx Re_{кр}$ .

Для  $d = 3,90 \pm 0,05$  мм:

$$l_{уст} = 39 \text{ см}.$$

Для  $d = 5,25 \pm 0,05$  мм:

$$l_{уст} = 52,5 \text{ см}.$$

Для  $d = 3,00 \pm 0,1$  мм:

$$l_{уст} = 30 \text{ см}.$$

2. Меняя расход воздуха краном К и наблюдая за столбиком спирта в микроманометре, визуаль-но определим границу перехода  $\Delta P_{кр}$  от ламинарного течения к турбулентному (турбулентный режим характеризуется заметными пульсациями давления во времени).

Для  $d = 3,90 \pm 0,05$  мм:  $\Delta P_{кр} \approx 224$  Па.

Для  $d = 5,25 \pm 0,05$  мм:  $\Delta P_{кр} \approx 250$  Па.

Для  $d = 3,00 \pm 0,1$  мм:  $\Delta P_{кр} \approx 187$  Па.

Экспериментальные значения близки к полученным теоретически.

3. Оценим погрешность измерения времени  $\sigma_t$ . Для этого проведем серию из 7–9 измерений времени прохождения через счётчик постоянного объёма газа при постоянном расходе и в качестве оценки для случайной погрешности измерения времени используем среднеквадратичное отклонение результатов.

№	1	2	3	4	5	6	7	8
$t, c$	12,40	12,56	12,14	11,89	12,24	12,23	12,68	12,07
$\sigma_t, c$	0,092							

4. Измерим зависимости перепада давления  $\Delta P$  на выбранных участках трубок от расхода газа  $Q$ .

Для  $l = 50$  см,  $d = 3,90 \pm 0,05$  мм.

$Q, л/с$	0,032	0,072	0,089	0,095	0,109	0,119	0,128	0,134
$\Delta P, Па$	49,033	121,6	168,7	200,1	276,5	339,3	396,2	429,5
$\sigma_Q, л/с$	0,0028							
$\sigma_P, Па$	5,88							

Для  $l = 50$  см,  $d = 5,25 \pm 0,05$  мм.

$Q, л/с$	0,095	0,127	0,146	0,165	0,183	0,210	0,233	0,264
$\Delta P, Па$	45,111	62,76	113,8	149,1	180,4	227,5	282,4	362,8
$\sigma_Q, л/с$	0,0028							
$\sigma_P, Па$	5,88							

Построим графики зависимости  $Q(\Delta P)$  (см. Рис. 3 и 4).

Из графиков видно, что для  $d = 3,90 \pm 0,05$  мм:  $\Delta P_{кр} \approx 190$ Па; для  $d = 5,25 \pm 0,05$  мм:  $\Delta P_{кр} \approx 230$  Па.

Пользуясь формулой Пуазейля, по угловым коэффициентам линейных участков определим вяз-кость воздуха  $\eta$ .

$$\eta = (2,2 \pm 0,4) \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$\eta = (1,3 \pm 0,56) \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

Рассчитаем критическое число Рейнольдса  $Re_{кр}$ :  $Re_{кр} \approx 1950$  (для  $d = 3,90 \pm 0,05$  мм)

5. Измерим распределение давления газа вдоль трубки  $P(x)$ .

Для  $Q = 0,128$  л/с,  $d = 5,25 \pm 0,05$  мм.

$\Delta P, Па$	86,29	133,4	200,1	276,5
$\sigma_P, Па$	5,88			
$l, см$	10,5	40,5	80,5	130,5
$\sigma_l, см$	0,5			

Для  $Q = 0,067$  л/с,  $d = 3,90 \pm 0,05$  мм.

$\Delta P$ , Па	94,1	158	247	359
$\sigma_P$ , Па	5,88			
$l$ , см	11	41	81	131
$\sigma_l$ , см	0,5			

Для  $Q = 0,089$  л/с,  $d = 3,00 \pm 0,10$  мм.

$\Delta P$ , Па	100	224	308
$\sigma_P$ , Па	5,88		
$l$ , см	6	26	46
$\sigma_l$ , см	0,5		

По результатам измерений построим графики  $P(x)$  зависимостей давления  $P$  от координаты вдоль трубы  $x$ . (см. Рис. 5)

Из графика оценим длину участка, на котором происходит установление потока:

Для  $d = 3,90 \pm 0,05$  мм :  $l_{уст} \approx 39$ см

Для  $d = 5,25 \pm 0,05$  мм :  $l_{уст} \approx 38$ см

Для  $d = 3,00 \pm 0,1$  мм :  $l_{уст} \approx 26$ см

6. Измерим зависимость расхода от радиуса трубы при заданном градиенте давления.

Сначала проведем измерения в ламинарном режиме. Установим  $\frac{\Delta P}{l} = \frac{51}{50} \approx 1 \frac{\text{мм вод ст}}{\text{см}} = \text{const}$

Для  $d = 3,90 \pm 0,05$  мм,  $Q = 0,060$  л/с.

Для  $d = 5,25 \pm 0,05$  мм,  $Q = 0,20$  л/с.

Для  $d = 3,00 \pm 0,1$  мм,  $Q = 0,018$  л/с.

Теперь проведем измерения в турбулентном режиме. Установим  $\frac{\Delta P}{l} = \frac{154}{50} \approx 3 \frac{\text{мм вод ст}}{\text{см}} = \text{const}$ .

Для  $d = 3,90 \pm 0,05$  мм,  $Q = 0,111$  л/с.

Для  $d = 5,25 \pm 0,05$  мм,  $Q = 0,271$  л/с.

Для  $d = 3,00 \pm 0,1$  мм,  $Q = 0,052$  л/с.

Изобразим результаты на графике в двойном логарифмическом масштабе  $\ln Q(\ln R)$  (Рис. 6). Наклон полученной прямой соответствует показателю степени  $\beta$  зависимости  $Q \sim R^\beta$ .

Для ламинарного режима:

$$\beta = 4,29 \pm 0,15$$

Для турбулентного режима:

$$\beta = 2,94 \pm 0,03$$

## 5 Вывод

В ходе работы:

- Были исследованы условия перехода течения из ламинарного режима в турбулентный.
- Было определено значение вязкости воздуха с помощью трубок разного диаметра:  $\eta = (2,2 \pm 0,4) \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ;  $\eta = (1,3 \pm 0,56) \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$ , табличное значение составляет  $\eta_{\text{табл}} = 1,78 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$ . Полученные значения равны в пределах погрешности. Основной вклад в погрешность итогового значения вязкости внесла погрешность измерения давлений.
- Были получены достаточно близкие к теоретическим значения длин установления для трубок трех диаметров.

Для  $d = 3,90 \pm 0,05 \text{ мм}$  :  $l_{\text{уст}} \approx 39 \text{ см}$

Для  $d = 5,25 \pm 0,05 \text{ мм}$  :  $l_{\text{уст}} \approx 38 \text{ см}$

Для  $d = 3,00 \pm 0,1 \text{ мм}$  :  $l_{\text{уст}} \approx 26 \text{ см}$

- Было установлено, что расход в ламинарном режиме пропорционален радиусу трубы в  $\beta = 4,29 \pm 0,15$  степени, а в турбулентном режиме - в  $\beta = 2,94 \pm 0,03$  степени.

Исследуемые зависимости представлены на графиках ниже.

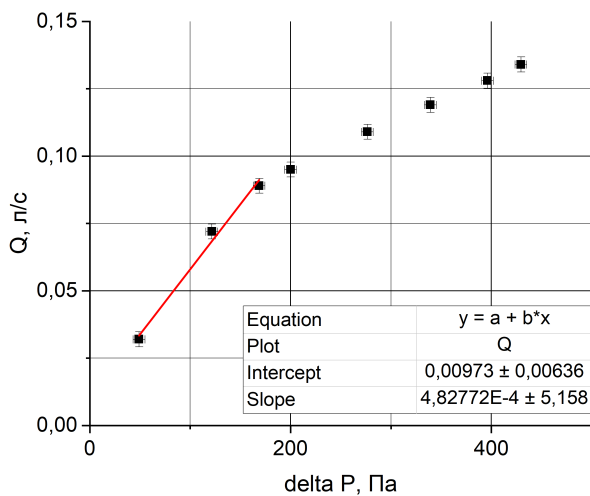


Рис. 3:  $d = 3,90 \pm 0,05 \text{ мм}$ .

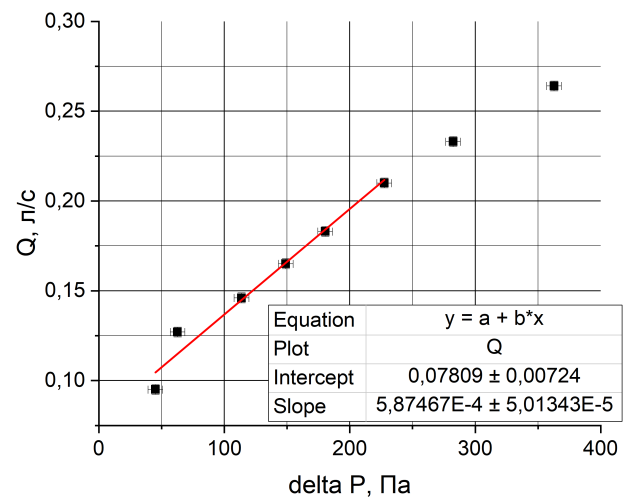


Рис. 4:  $d = 5,25 \pm 0,05 \text{ мм}$ .

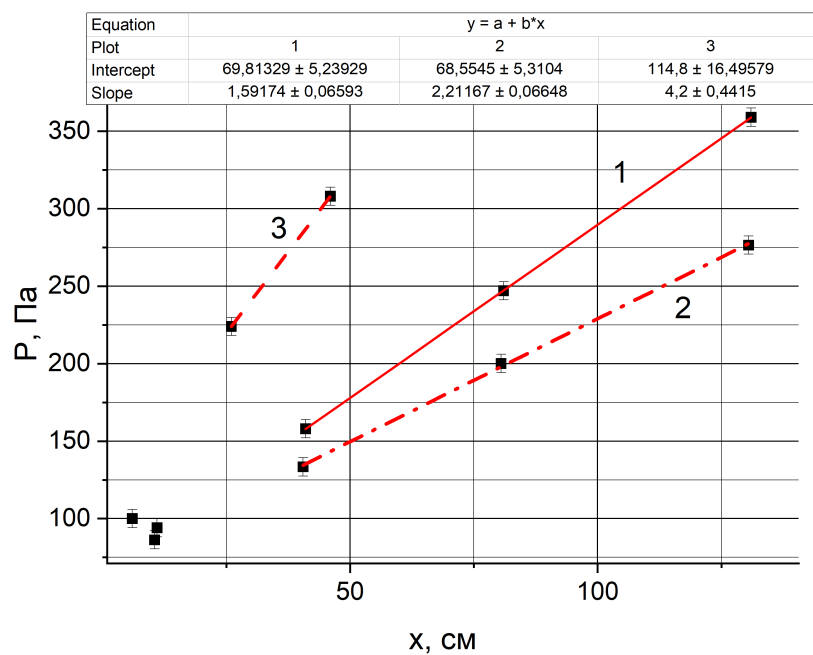


Рис. 5: 1)  $d = 5,25 \pm 0,05$  мм; 2)  $d = 3,90 \pm 0,05$  мм; 3)  $d = 3,00 \pm 0,10$  мм.

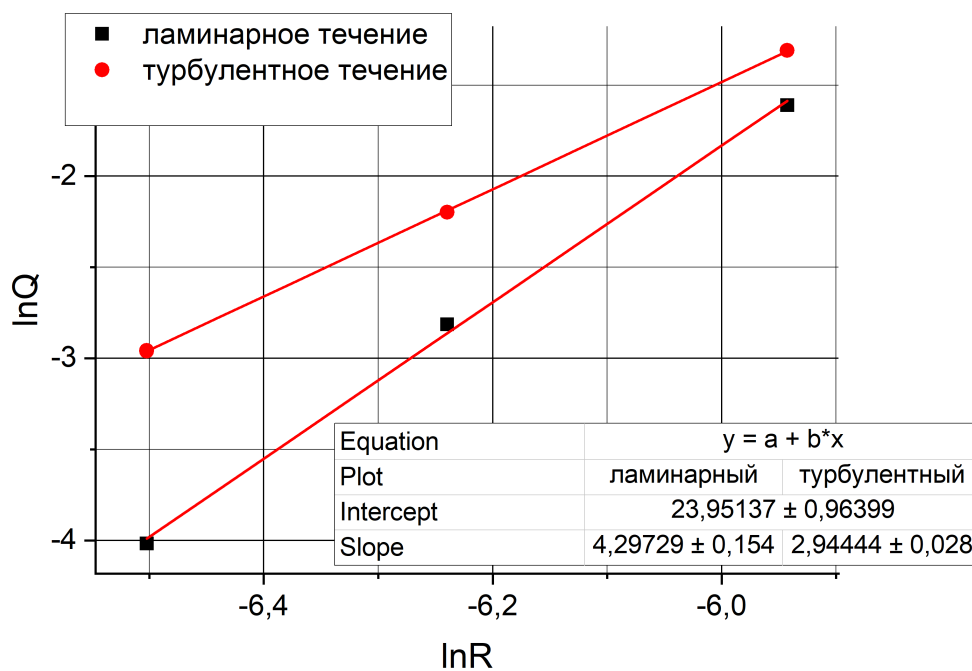


Рис. 6: Зависимость  $\ln Q(\ln R)$