

Лабораторная работа №1.3.3
Измерение вязкости воздуха
по течению в тонких трубках
Мещеряков Всеволод, Б02-001, 08.04.2021

Введение

Работа ставит цели исследовать свойства течения газов по тонким трубкам при различных числах Рейнольдса, определить коэффициент вязкости воздуха. Для этого используются компрессор, проводящие трубки, газовый барабанный счётчик, спиртовой микроманометр, секундомер.

Теоретическая справка

Центральным законом в этой работе является течение Пуазейля. Она применима, так как используемые приближения справедливы: газ несжимаем (действительно, ведь, как будет измерено далее, $\Delta P \ll P$) и скорость его движения много меньше скорости звука. Формула Пуазейля связывает объемный расход, перепад давления, геометрию трубы и коэффициент вязкости жидкости (в нашем случае газа):

$$Q = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8\eta l}. \quad (1)$$

В формуле (1) Q - объемный расход - объем газа, протекающего в единицу времени, r - радиус трубки, η - коэффициент вязкости, ΔP - перепад давления на концах рассматриваемого участка, l - длина рассматриваемого участка трубки. Она справедлива для ламинарного течения, критерием которого является малость числа Рейнольдса (в пределах 10^3). Оно позволяет теоретически определить тип течения, а физический смысл таков, что число равно отношению кинетической энергии потока к мощности сил вязкого трения:

$$Re = \frac{\rho u a}{\eta}. \quad (2)$$

В формуле (2) ρ - плотность газа, которая может считаться постоянной ввиду его несжимаемости, u - характерная скорость потока, a - характерный размер системы (размер, на котором существенно меняется скорость течения) - в нашем случае длина трубки, η - коэффициент вязкости среды.

Из формулы (1) можем получить среднюю скорость потока \bar{u} :

$$\bar{u} = \frac{Q}{\pi r^2}. \quad (3)$$

Так же в работе существенную роль играет длина установления - расстояние, которое необходимо пройти течению, чтобы его профиль установился. Как показывает опыт, эта величина приблизительно равна:

$$l_{\text{уст}} \approx 0,2r \cdot Re. \quad (4)$$

Экспериментальная установка

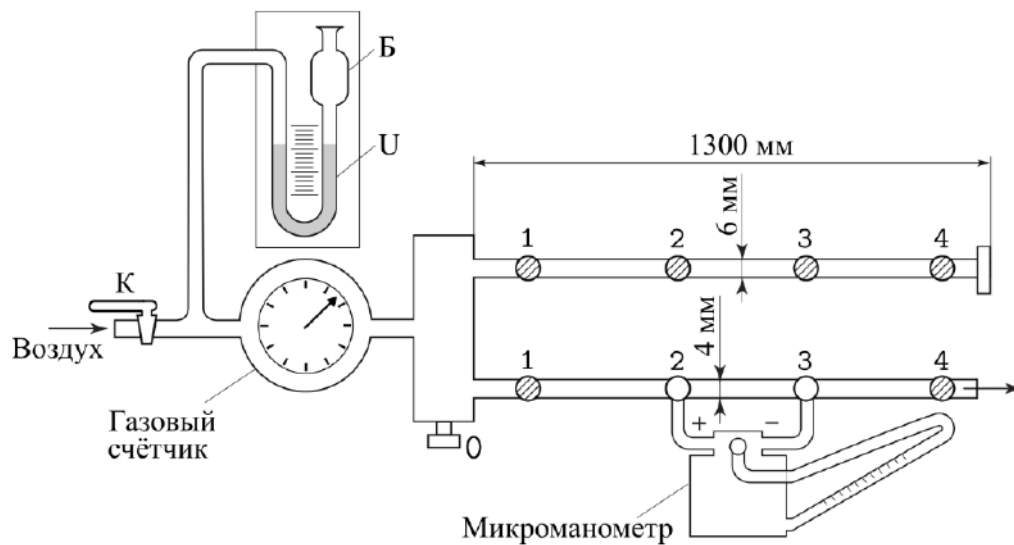


Рис. 1 — Схема установки

Схема экспериментальной установки изображена на Рис. 1. 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. 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 предохраняет счётчик от выхода из строя. При превышении максимального избыточного давления на входе счётчика (30 см вод.ст.) вода выплёскивается из трубки в защитный баллон Б, создавая шум и привлекая к себе внимание экспериментатора

Ход работы

Измерим давление и температуру в комнате: $P = (992 \pm 2) \cdot 10^2(\text{Па})$, $t = 24^\circ\text{C}$. После успешных предварительных настройки и запуска произведем предварительные расчёты.

Оценим расход $Q_{\text{кр}}$ и перепад давлений $\Delta P_{\text{кр}}$ для трубки $d_1 = 3,95 \pm 0,05(\text{мм})$, при которых число Рейнольдса станет равным критическому $Re \approx 10^3$. Для этого примем вязкость воздуха равной $\eta_{\text{возд}} \approx 2 \cdot 10^{-5}(\text{Па} \cdot \text{с})$, а плотность оценим по уравнению состояния идеального газа, характерную скорость потока возьмем из формулы (3). Так же оценим длину установления. Получим:

$$Q_{\text{кр}} \approx 0,1(\text{л/с}), \Delta P_{\text{кр}} \approx 160(\text{Па}), l_{\text{уст}} \approx 40(\text{см}). \quad (5)$$

Согласно паспорту манометра, одно его деление будет равняться $0,2 \cdot 9,8 \text{ Па}$. С учетом этого для трубки d_1 начнем снимать зависимость перепада давления ΔP от объемного расхода Q . Результаты измерений отразим в таблице 1 приложения.

Погрешность измерения времени возьмем как удвоенную реакцию человека (старт - стоп), давления как цену деления манометра, объема как цену деления и по классу точности.

Измерим распределение давления при максимально возможном объемном расходе для разных длин трубок. Результаты измерений отразим в таблице 2 приложения.

Аналогичные измерения проведем для трубки $d_2 = 5,1 \pm 0,05$ (мм). Результаты отразим в таблицах 3 и 4 приложения. Точки легли на прямую, не проходящую через начало координат. Это значит, что все они были сняты при турбулентном течении.

Измерим зависимость $Q(R)$, результаты отразим в таблице 5 приложения. Из них определим тип зависимости. Согласно теории, при турбулентном течении $Q \sim R^4$. Действительно, построив график в логарифмических координатах, из наклона прямой вычисляется показатель истинной зависимости, который приблизительно равен 4.

Приложение

Таблица 1 — *Зависимость перепада давления от объемного расхода для первой трубки d_1*

$\Delta t, c$	σ_t, c	$\Delta P, Па$	$\sigma_p, Па$	$\Delta V, л$	$\sigma_V, л$
90	1	31	3	2	0,1
116	1	57	4	4	0,1
116	1	71	5	5	0,1
108	1	92	6	6	0,2
112	1	118	7	8	0,2
108	1	139	9	9	0,3
граница турбулентного и ламинарного течений					
110	1	155	9	10	0,3
98	1	184	11	9	0,3
100	1	225	14	11	0,3
107	1	255	15	12	0,4
102	1	290	18	12	0,4
98	1	321	19	12	0,4
94	1	365	22	12	0,4

Таблица 2 — Зависимость перепада давления от объемного расхода для второй трубки d_2

$\Delta t, c$	σ_t, c	$\Delta P, Па$	$\sigma_P, Па$	$\Delta V, л$	$\sigma_V, л$
104	1	27	3	3	0,1
107	1	37	3	4	0,1
99	1	59	4	4	0,1
103	1	69	5	5	0,2
113	1	80	5	6	0,2
116	1	96	6	7	0,2
109	1	122	8	8	0,2
граница турбулентного и ламинарного течений					
104	1	147	9	9	0,3
113	1	176	11	11	0,3
107	1	210	13	12	0,4
100	1	274	17	12	0,4
98	1	314	19	12	0,4
112	1	353	21	16	0,5
103	1	392	24	17	0,5

Таблица 3 — Зависимость перепада давления от длины первой трубки d_1

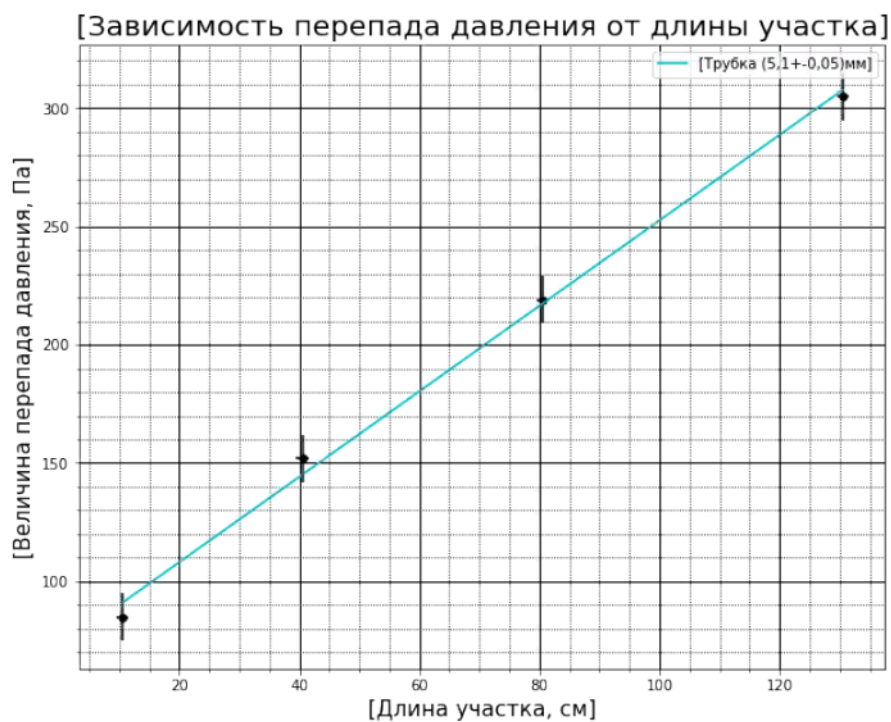
$L, см$	$\sigma_L, см$	$\Delta P, Па$	$\sigma_P, Па$
130,5	0,5	451	29
90,5	0,5	314	20
40,5	0,5	186	12
10,5	0,5	90	6

Таблица 4 — Зависимость перепада давления от длины второй трубки d_2

$L, см$	$\sigma_L, см$	$\Delta P, Па$	$\sigma_P, Па$
130,5	0,5	305	20
80,5	0,5	219	14
40,5	0,5	152	10
10,5	0,5	85	6

Таблица 5 — Величина расхода для разных трубок при турбулентном течении

d , мм	5,1	5,05	3,95
σ_d , мм	0,05	0,05	0,1
Q , л/с	0,1025	0,0935	0,0272
σ_Q , л/с $\cdot 10^{-4}$	22,92	20,91	6,08

Рис. 2 — Зависимость перепада давления от длины участка на d_1

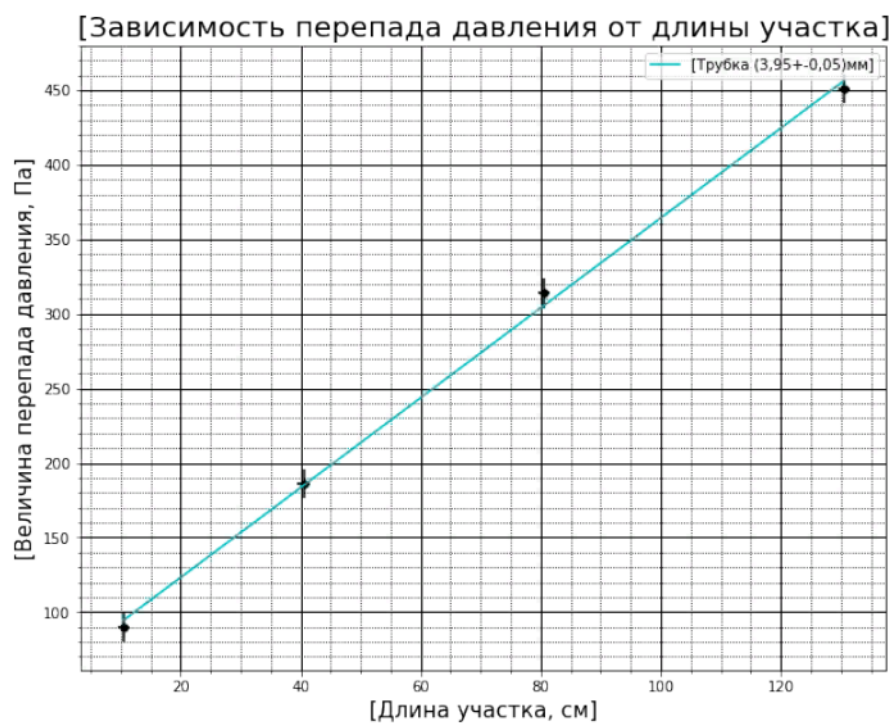


Рис. 3 — Зависимость перепада давления от длины участка на d_2

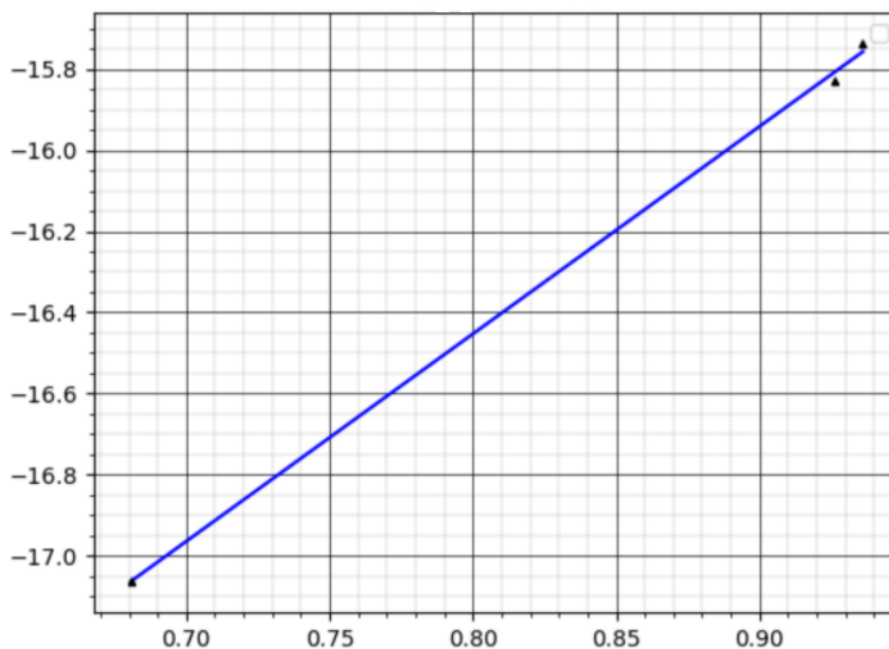


Рис. 4 — Зависимость расхода от диаметра трубки в логарифмических координатах