

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ВОЗДУХА

Цель работы: экспериментальное определение коэффициента внутреннего трения воздуха по скорости течения воздуха через капилляр.

Литература: [4] гл. 5 §§ 5.1, 5.2, 5.6; гл. 1 § 1.5; [7] гл. 7 §§ 7.1, 7.2, 7.5, 7.6; [10] гл. XII § 97; [19] гл. 6 §§ 6.2–6.3.

Приборы и принадлежности: специальный прибор для определения коэффициента внутреннего трения воздуха, секундомер, мензурка, термометр, барометр.

ВВЕДЕНИЕ

Для реальных жидкостей и газов характерно явление вязкого трения, которое, подобно диффузии и теплопроводности, относится к классу явлений переноса. Если в процессе ламинарного течения разные слои жидкости или газа имеют различные скорости, то при беспорядочном движении молекул эти слои будут обмениваться импульсом упорядоченного движения. В результате этого между слоями возникает сила вязкого трения F , величина которой определяется формулой

$$F = \eta \frac{du}{dx} S, \quad (1)$$

где η – коэффициент вязкости среды, u – скорость течения жидкости или газа, x – координата, перпендикулярная к скорости, вдоль которой происходит изменение скорости движения газа, S – площадь поверхности слоя. Быстрота выравнивания скорости определяется отношением ν/ρ , где ρ – плотность газа или жидкости. Величину $\nu = \eta/\rho$ называют кинематической вязкостью, η называют динамической вязкостью.

Из-за вязкости при ламинарном течении воздуха через капилляр скорости течения бесконечно тонких цилиндрических слоев воздуха, расположенных на различных расстояниях от оси цилиндра, будут различны.

Сила трения, действующая на элементарный цилиндрический объем и приложенная к боковой поверхности цилиндра, при установившемся движении воздуха в капилляре уравнивает разность сил давления, действующих на основания цилиндра. В этом случае объем воздуха ΔV , протекающего через сечение капилляра радиуса r за время τ (при разности давлений Δp на концах капилляра длиной l), определяется формулой Пуазейля:

$$\Delta V = \frac{\pi r^4 \Delta p \tau}{8 \eta l}. \quad (2)$$

Измерив объем воздуха ΔV , протекший через капилляр за время τ , можно найти вязкость:

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta p \tau}{8 \Delta V l}. \quad (3)$$

Подчеркнем, что при выводе (2) плотность воздуха считалась постоянной, а течение ламинарным. В нашей экспериментальной установке перепад давлений составляет менее одного процента от атмосферного, поэтому первое предположение хорошо выполняется. Что касается характера движения (ламинарное или турбулентное), то он определяется безразмерным числом Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{ur\rho}{\eta}. \quad (4)$$

В гладких трубах круглого сечения переход от ламинарного течения к турбулентному происходит при $\text{Re} \sim 1000$.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ



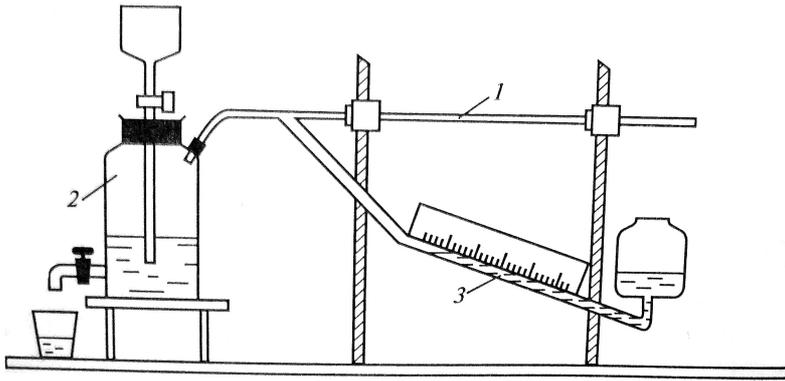


Рис. 5.3.1

Схема прибора, с помощью которого производится экспериментальное определение η , изображена на рисунке 5.3.1. Главная часть прибора – капилляр 1, через который протекает воздух из атмосферы в газометр 2 (в новом варианте установки этот капилляр закреплен вертикально на сосуде газометра 2 – см. фотографию). При вытекании воды из газометра 2 на концах капилляра создается разность давлений Δp , измеряемая наклонным спиртовым манометром 3. Трубка манометра установлена не вертикально, а под углом $\alpha = 30^\circ$ к горизонту, что повышает чувствительность прибора. Если во время измерения столбик спирта в манометре сместился на длину Δx , то разность давлений на концах капилляра $\Delta p = \rho_c g \Delta x \cdot \sin \alpha$, где $\rho_c = 800 \text{ кг/м}^3$ – плотность спирта. Объем воздуха, протекшего через капилляр, равен объему воды ΔV , вылившейся из газометра. Этот объем измеряют мензуркой.

Значения угла наклона трубки манометра, радиуса капилляра r и длины капилляра l указаны на табличке рядом с установкой:

$$\alpha = 30^\circ, \quad l = 36 \text{ см}, \quad r = 0,53 \text{ мм}.$$

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Зафиксируйте в протоколе начальную координату x_0 конца столбика спирта в манометре. Отрегулируйте скорость вытекания жидкости из газометра с помощью крана. При работе на установке следите за тем, чтобы спирт из наклонной трубки манометра не попадал в капилляр и гибкие шланги. Добейтесь, чтобы столбик спирта сместился вдоль шкалы манометра на расстояние Δx от 20 до 80 мм и установился на определенной отметке. Измерьте, за какое время τ через капилляр протечет объем воздуха $\Delta V = 100$

мл при установившемся режиме течения воздуха через капилляр (если во время измерения столбик спирта начнет сильно смещаться, измерение можно прекратить при меньшем объеме вытекшей воды, но ΔV не должен быть менее 50 мл). Проведите описанные измерения при пяти различных значениях разности давления Δp . Данные измерений и вычислений занесите в таблицу.

№	ΔV , мл	τ , с	Δx , мм	Δp , Па	$\frac{\Delta V}{\tau}$, м ³ /с	η , Па·с
1	100					
2						
...						

Постройте график зависимости Δp от расхода воздуха $\frac{\Delta V}{\tau}$. Убедитесь, что точки ложатся на прямую, проходящую через начало координат (если какая-то точка оказывается вдали от прямой, она считается промахом). По наклону этой прямой можно рассчитать среднее значение η .

По формуле (3) подсчитайте коэффициент внутреннего трения воздуха η .

Измерьте температуру воздуха в комнате и атмосферное давление.

Рассчитайте плотность воздуха: $\rho = \frac{pM}{RT}$ ($M = 29$ г/моль – молярная масса воздуха, T – абсолютная температура). Рассчитайте кинематическую вязкость воздуха $\nu = \eta / \rho$.

Оцените по формуле (4) значение числа Рейнольдса при максимальном значении Δp . Для этого рассчитайте среднюю скорость течения воздуха u по известным значениям ΔV , r и τ :

$$\Delta V = \pi r^2 u \cdot \tau, \quad u = \frac{\Delta V}{\pi r^2 \tau}.$$

Сделайте вывод о характере течения газа.

ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Пользуясь молекулярно-кинетической теорией, покажите, от каких величин зависит коэффициент внутреннего трения в газах.
2. По какому закону меняются скорости течения отдельных слоев газа от стенки к оси трубки при ламинарном течение?
3. Как изменится коэффициент внутреннего трения газа при увеличении давления в 2 раза ($T = \text{const}$); увеличении температуры в 2 раза ($p = \text{const}$)?
4. Как изменится коэффициент кинематической вязкости при увеличении давления в 2 раза ($T = \text{const}$)?
5. По значению η оцените длину свободного пробега молекул азота при нормальных условиях.
6. Получите формулу Пуазейля (2).