

## Теоретическая часть

В неоднородном потоке газа (жидкости) между соседними слоями, движущимися с различными скоростями, действуют силы вязкого трения, которые тормозят более быстрый слой и ускоряют медленный. На молекулярном уровне силы вязкого трения связаны с переносом упорядоченного импульса между слоями газа [1]. Для потока, скорость которого  $\vec{v}$  направлена вдоль оси  $x$  и зависит от координаты  $y$  (рис. 1), т.е.  $v_x = v_x(y)$ , сила вязкого трения  $F$  определяется формулой

$$F = \eta S \left| \frac{dv_x}{dy} \right|, \quad (1)$$

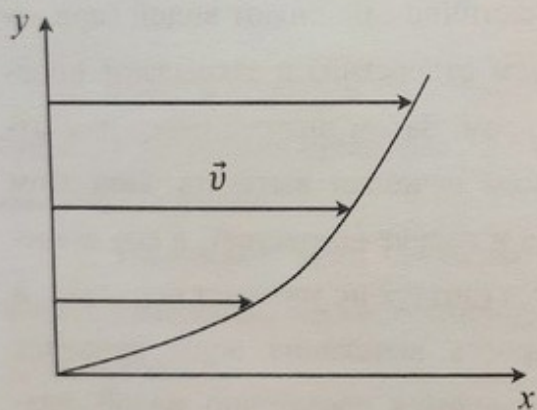


Рис. 1. Неоднородный поток газа

где  $S$  – площадь взаимодействующих слоев, а  $\eta$  – коэффициент вязкости. В системе СГС коэффициент вязкости измеряется в пуазах (П) и имеет размерность  $\text{г}/(\text{см} \cdot \text{с})$ .

Коэффициент вязкости можно измерить, исследуя течение газа через цилиндрическую трубку малого сечения (капилляр). При ламинарном течении газа по капилляру связь между разностью давлений газа  $\Delta p$  на концах капилляра и объемом  $Q$  газа, протекающим через капилляр в единицу времени (расходом газа), дается формулой Пуазейля [2]

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta L} \Delta p, \quad (2)$$

где  $R$  – радиус капилляра, а  $L$  – его длина. Измеряя на опыте  $Q$  и  $\Delta p$ , по формуле (2) можно определить (при известных значениях  $R$  и  $L$ ) коэффициент вязкости  $\eta$ .

## Экспериментальная установка

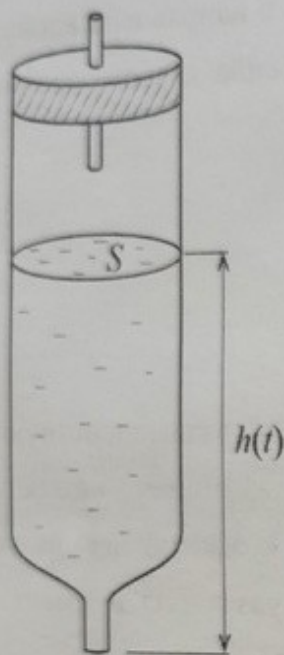


Рис. 2. Схема установки

Экспериментальная установка для определения коэффициента вязкости воздуха представляет собой цилиндрический сосуд с небольшим отверстием внизу, который сверху закрывается пробкой с плотно вставленным в нее капилляром (рис. 2). К сосуду прикреплена вертикальная шкала для измерения уровня воды в сосуде.

Сосуд частично заполняют водой (при закрытом нижнем отверстии) и закрывают пробкой с капилляром. Затем нижнее отверстие открывают, и вода начинает вытекать. При этом объем воздуха в сосуде возрастает, а его давление понижается (воздух не успевает поступать в сосуд через капилляр). В результате скорость вытекания воды начинает уменьшаться. Когда скорость вытекания становится достаточно малой, разность давлений воздуха вне сосуда (атмосферного давления) и внутри сосуда можно считать равной статическому давлению столба воды изменяющейся со временем высоты  $h(t)$ , т.е.  $\rho gh(t)$ , где  $\rho$  – плотность воды,  $g$  – ускорение свободного падения. Такая же разность давлений устанавливается и на концах капилляра, т.е.  $\Delta p = \rho gh(t)$ .

Объем  $Q$  воздуха, втекающего через капилляр за 1 секунду, равен объему вытекающей за 1 секунду воды и, таким образом, равен скорости понижения уровня воды, умноженной на площадь сечения сосуда:



$$Q = -S \frac{dh}{dt}. \quad (3)$$

Знак "-" учитывает, что производная  $dh/dt$  отрицательна.

Из формул (2) и (3) следует

$$S \frac{dh}{dt} = -\frac{\pi R^4}{8\eta L} \rho g h. \quad (4)$$

Интегрируя уравнение (4), находим, что понижение уровня воды в сосуде происходит по экспоненциальному закону:

$$h(t) = h_0 e^{-t/\tau}, \quad (5)$$

где  $\tau = \frac{8\eta LS}{\pi R^4 \rho g}$  – характерное время вытекания воды,  $h_0$  – высота уровня воды в момент начала отсчета времени.

### Порядок проведения эксперимента

1. Вынуть пробку с капилляром и, закрыв нижнее отверстие, налить в сосуд воду до уровня примерно 50 см. Затем плотно вставить пробку и открыть нижнее отверстие.

2. Подождать, пока скорость истечения воды из сосуда станет малой, начать измерения, занося в таблицу моменты времени  $t$  и соответствующие им уровни воды  $h$ .

3. Используя полученную таблицу значений  $h(t)$ , построить график зависимости  $\ln(h/h_0)$  от времени. Убедиться в том, что зависимость линейная.

4. Определить коэффициент  $\tau$  по наклону прямой на графике и рассчитать коэффициент вязкости по формуле

$$\eta = \frac{\pi R^4 \rho g \tau}{8LS}, \quad (6)$$

## Контрольные вопросы

1. Формула Пуазейля (2) справедлива для ламинарного режима течения, который имеет место при значениях числа Рейнольдса, удовлетворяющих условию

$$\text{Re} = \frac{\rho v R}{\eta} \leq 1100, \quad (7)$$

где  $\rho$  и  $\eta$  – плотность и коэффициент вязкости воздуха,  $v$  – характерная скорость течения воздуха в капилляре,  $R$  – радиус капилляра. Оцените число Рейнольдса для условий эксперимента и ответьте на вопрос: было ли течение в капилляре ламинарным?

2. Закон (5) понижения уровня воды в сосуде со временем получен в предположении, что перепад давлений на границах воды равен статическому значению  $\rho gh$ . Это предположение не учитывает движения жидкости. Оцените величину ошибки, допускаемой при определении давления, считая воду идеальной жидкостью.

*Указание.* Воспользуйтесь уравнением Бернулли.

3. С помощью найденного в работе коэффициента вязкости оцените среднюю длину свободного пробега и диаметр молекул воздуха.

4. Оцените, на сколько должен опуститься уровень воды после открытия нижнего отверстия, чтобы в свободной от воды части сосуда установилось давление воздуха на  $\rho gh$  ниже атмосферного.

*Указание.* При рассмотрении процесса установления можно пренебречь изменением массы воздуха в сосуде и связать понижение давления воздуха с увеличением его объема в сосуде из-за вытекания воды.