

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**имени М. В. Ломоносова**

---

**Физический факультет  
кафедра общей физики и физики конденсированного состояния**

**Методическая разработка  
по общему физическому практикуму**

**Лаб. работа № 32**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА  
ПО СКОРОСТИ ИСТЕЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ  
КАПИЛЛЯР**

**Описание составил ст. преп. Богданов А.Е.**

**Москва - 2012**

Подготовил методическое пособие к изданию доц. Авксентьев Ю.И.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА ПО СКОРОСТИ ИСТЕЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ КАПИЛЛЯР

**Цель работы.** Целью работы является определение коэффициента динамической вязкости  $\eta$  воздуха в интервале температур 20-100°C по скорости его истечения через капилляр.

### ВЯЗКОСТЬ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

При движении соприкасающихся слоев газа (жидкости) друг относительно друга между ними действуют силы *внутреннего трения*, или силы *вязкости*. Например, если размещать жидкость в стакане, то ее движение из-за наличия сил вязкости постепенно прекратится. Другим примером такого движения может являться течение газа (жидкости) внутри трубки или капилляра. Наличие сил вязкости приводит к тому, что скорость течения  $v$  зависит от расстояния до оси

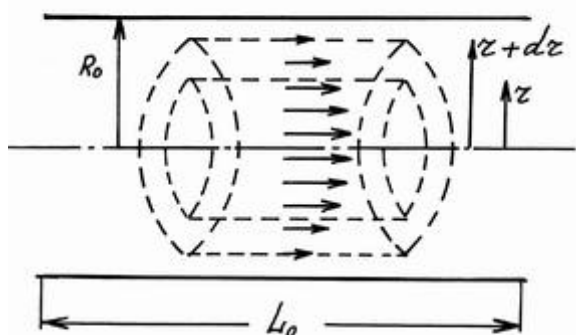


Рис. 1

трубки  $r$  (см. рис.1, где скорость течения условно обозначена стрелками). Она равна нулю непосредственно вблизи стенок трубки ( $v(R_0)=0$ ), а на ее оси ( $r=0$ ) достигает максимального значения. Для простоты в дальнейшем будем говорить только о газах, и, если не оговорено особо, все приведенные выше формулы будут относиться также и к жидкостям. Законы движения газов и жидкостей существенно различаются между

собой только при достаточно больших скоростях движения, когда необходимо учитывать сжимаемость газов, например, при рассмотрении задач на движение самолетов со сверхзвуковой скоростью или явлений, сопровождающих взрывы. В описанных выше примерах скорость движения лежит в таких пределах, что газ можно считать несжимаемым.

Возникновение сил вязкости в газе связано с тем, что его молекулы участвуют одновременно в двух движениях: упорядоченном и хаотическом тепловом. В нашем примере упорядоченное или макроскопическое движение газа — это его течение по трубке. Кроме того молекулы газа двигаются хаотически, причем среднее значение модуля

скорости теплового хаотического движения молекул обычно значительно превышает скорость упорядоченного движения, т.е. скорость течения.

Выделим условно слой газа,двигающийся по трубке круглого сечения с некоторым определенным значением скорости  $v$ . Этот слой представляет собой полый цилиндр с внутренним радиусом  $r$  и внешним  $r+dr$  и обозначен на рис.1 пунктиром. В этот слой в результате теплового движения попадают молекулы из соседних слоев. Из внешнего слоя с большим значением  $r$  в выделенный слой попадают молекулы с меньшей скоростью, и наоборот -- из внутреннего слоя попадают молекулы с большей скоростью. Происходит передача импульса упорядоченного движения молекул в процессе их теплового движения. Внутренний слой ускоряет, а внешний тормозит течение газа в выделенной области, что и является проявлением сил внутреннего трения или сил вязкости. Тонкий слой газа, непосредственно примыкающий к стенкам трубки, обволакивает ее и замедляет движение соседнего слоя, который в свою очередь оказывает влияние на следующий слой, и т.д. Отметим, что приведенное качественное объяснение механизма внутреннего трения относится только к газам. В жидкостях природа вязкости связана с непосредственным электрическим взаимодействием молекул.

Величина силы вязкости  $F$ , как следует из опыта, прямо пропорциональна площади соприкасающихся слоев газа  $S$  и градиенту скорости их движения по перпендикулярному ей направлению  $r$ , т.е. производной  $dv/dr$  (формула Ньютона):

$$F = \eta S \frac{dv}{dr} \quad (1)$$

где  $\eta$  — коэффициент вязкости или просто вязкость. Для газов коэффициент вязкости  $\eta$  зависит от температуры ( $\eta \sim \frac{\sqrt{mT}}{\sigma}$ , где  $m$ -- масса молекулы газа,  $\sigma$  -- ее

эффективное сечение) и не зависит от давления. Вязкость жидкостей, напротив, с увеличением температуры уменьшается. Единицей измерения вязкости в СИ служит [Па·с] (паскаль-секунда)<sup>1</sup> Определенный таким образом коэффициент вязкости  $\eta$  в литературе называется также коэффициентом динамической вязкости. Для воздуха при комнатной температуре и атмосферном давлении коэффициент вязкости  $\eta$  составляет  $1.85 \cdot 10^{-5}$  Па·с. Примерами жидкостей с небольшой вязкостью могут служить бензин, вода ( $\eta = 0.1$  Па·с при тех же условиях), с большой вязкостью -- глицерин  $C_3H_8O_3$  ( $\eta = 1.48$  Па·с), масло, смола.

В рассмотренном выше примере (рис.1) характер течения по трубке зависит от скорости течения  $v$ , плотности  $\rho$  и вязкости  $\eta$  движущейся

<sup>1</sup> 1 Пуаз=0.1 Па·с

среды. Количественно эта зависимость определяется значением числа Рейнольдса  $Re = \rho v l / \eta$  ( $l$  -- характерный размер трубки, например ее радиус). При небольших значениях  $Re$  течение будет ламинарным и стационарным. Ламинарный характер течения означает, что слои газа не перемешиваются между собой, в этом случае можно выделить линии или трубки тока, по которым движутся частицы газа. Течение является стационарным, если его скорость в каждой точке не зависит от времени и имеет постоянное значение. При превышении числом  $Re$  некоторой величины характер течения становится вихревым, или турбулентным.

При ламинарном течении газа с плотностью  $\rho$  и вязкостью  $\eta$  вдоль трубки с внутренним радиусом  $R_0$  и длиной  $L_0$  расход  $\theta$  газа определяется формулой Пуазейля:

$$\theta = \frac{\pi \rho R_0^4 \Delta P}{8 \eta L_0} \quad (2)$$

где  $\Delta P$  -- разность давлений на концах трубки. По ходу течения давление уменьшается. Величина расхода  $\theta$  показывает, какая масса газа проходит за единицу времени через поперечное сечение трубки с учетом действия сил вязкого трения. Формула Пуазейля (2) является следствием формулы Ньютона (1).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД

Воздух накачивается в сосуд до давления, превышающего атмосферное на некоторую величину  $\Delta P_{нач}$ , а затем постепенно выходит из сосуда в атмосферу через трубку малого диаметра – капилляр. При этом разность  $\Delta P$  давления в сосуде и атмосферного давления уменьшается с течением времени. Фиксируются значения времени  $t$ , при которых достигаются определенные разности давлений  $\Delta P$ . Коэффициент вязкости  $\eta$  рассчитывается по тангенсу угла наклона прямой, соответствующего линейному участку зависимости  $\ln(\Delta P / \Delta P_{нач})$  от  $t$ . Расчетные формулы выводятся для небольших по сравнению с атмосферным давлением значений  $\Delta P$ .

## ВЫВОД РАСЧЕТНОЙ ФОРМУЛЫ

При проведении эксперимента воздух вытекает из сосуда объемом  $V_0$  через капилляр длины  $L_0$  и диаметра  $D_0$  в атмосферу. Запишем уравнение состояния для воздуха в этом сосуде:

$$pV_0 = \frac{m}{\mu} RT, \quad (3)$$

где  $\mu$  — молярная масса воздуха,  $m$  — масса воздуха в сосуде,  $R$  — универсальная газовая постоянная ( $R=8.314$  Дж/мольК). Считая температуру воздуха в сосуде постоянной, для производной  $dP/dt$  давления по времени можно записать:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{RT}{V_0\mu} \frac{dm}{dt} = -\frac{RT}{V_0\mu} \theta. \quad (4)$$

Знак “минус” в этом соотношении показывает, что с течением времени количество воздуха в сосуде уменьшается. Расход воздуха  $\theta = -dm/dt$  при его ламинарном стационарном течении определяется формулой Пуазейля (2), в которой  $\Delta P = P - P_0$  — разность давлений на концах капилляра,  $L_0$  — длина капилляра,  $R_0$  — его радиус. Плотность воздуха  $\rho = m/V_0$  можно выразить из уравнения состояния (3):

$$\rho = \frac{m}{V_0} = \frac{P\mu}{RT}. \quad (5)$$

Подставляя (5) и (2) в (4) и учитывая, что  $R_0 = D_0/2$ ,  $dP = d(\Delta P)$ ,  $P = P_0 + \Delta P$ , получаем дифференциальное уравнение:

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{\pi D_0^4 (P_0 + \Delta P) \Delta P}{128\eta L_0 V_0}. \quad (6)$$

Его можно упростить, принимая во внимание, что разность давлений  $\Delta P$  мала по сравнению с атмосферным давлением. Примем стоящее в правой части (6) давление в сосуде  $P_0 + \Delta P$  равным некоторому среднему значению  $\langle P \rangle$  за время проведения эксперимента, разделим переменные в полученном линейном уравнении и преобразуем его левую часть:

$$\frac{d(\Delta P)}{\Delta P} = -\frac{\pi \langle P \rangle D_0^4}{128\eta L_0 V_0} dt, \\ d \ln(\Delta P) = A dt. \quad (7)$$

Постоянная  $A$  дается выражением:

$$A = -\frac{\pi \langle P \rangle D_0^4}{128\eta L_0 V_0}.$$

Интегрируя левую часть уравнения (7) в пределах от  $\ln(\Delta P_{нач})$  до  $\ln(\Delta P)$ , а правую в пределах от  $0$  до  $t$  и используя формулу для разности логарифмов, получим:

$$\ln(\Delta P / \Delta P_{нач}) = At.$$

Введем обозначения:  $Y = \ln(\Delta P / \Delta P_{нач})$ ,  $X = t$ . Тангенс  $A$  угла наклона прямой

$$Y = AX \quad (8)$$

позволяет определить значение коэффициента вязкости  $\eta$  по формуле:

$$\eta = \frac{\pi \langle P \rangle D_0^4}{128|A|L_0 V_0} \quad (9)$$

где  $|A|$  — абсолютное значение углового коэффициента  $A$  прямой  $Y(X)$ .

## ИЗМЕРЕНИЯ

Задача может выполняться на лабораторных комплексах *ЛКТ-2* (при различных температурах), *ЛКТ-5* и *ЛКТ-10* (при комнатной температуре). Измерения на каждом комплексе рекомендуется проводить вдвоем: один человек фиксирует и диктует показания электронных часов, второй их записывает. Электронные часы предназначены для измерения интервалов времени с разрешением  $0.01$  с. и управляются тремя кнопками. Кнопка “*MODE*” — выбор режима работы. В режиме “*секундомер*” мигает надпись “*SUN ... SAT*” в верхней части дисплея. Кнопка “*ADVANCE*” в режиме “*секундомер*” запускает и останавливает отсчет времени. Если не

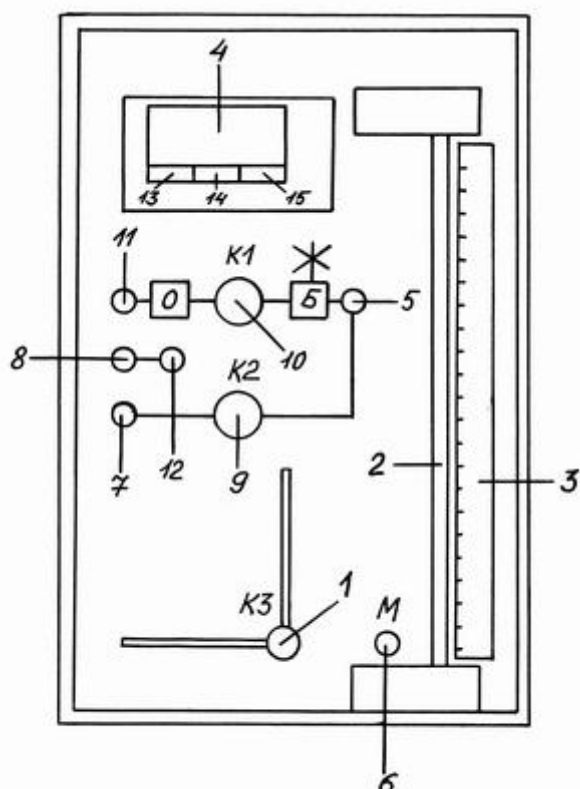


Рис. 2

сбрасывать отсчеты, то происходит суммирование измеряемых интервалов времени. Кнопка “*SET*”, нажатая в процессе отсчета времени, фиксирует показания дисплея, но не останавливает отсчет времени. При повторном нажатии этой кнопки показания дисплея будут соответствовать продолжающемуся отсчету времени. Кнопка “*SET*”, нажатая при остановленном отсчете времени (после нажатия кнопки “*ADVANCE*”), сбрасывает (обнуляет) отсчет и показания дисплея. В некоторых моделях электронных часов средняя кнопка “ $\Delta \Delta$ ” объединяет функции “*SET*” и “*ADVANCE*”, при этом нажатие на левый край кнопки “ $\Delta \Delta$ ” соответствует “*SET*”, на правый — “*ADVANCE*”.

**ЛКТ-5.** Все элементы комплекса размещены в корпусе, состоящем из передней панели и двух боковин. Органы управления вынесены на переднюю панель, на которой нанесена схема соединений элементов комплекса (рис.2).

Основной элемент комплекса — *б а л л о н* объемом 3.0 л, который находится за передней панелью (на рис.2 не показан). Баллон снабжен краном *К3* (1), рукоятка которого выведена на панель прибора. В целях безопасности на баллон в рабочем состоянии надет мешок из плотной ткани. За передней панелью установлен осушитель (стеклянный баллончик с силикагелем), удерживаемый пружиной.

Дифференциальный *водяной манометр* (2) состоит из нижнего и верхнего бачков, соединенных прозрачной трубкой. Вблизи трубки расположена линейка (3), по которой отсчитывается уровень жидкости в пределах от 0 до 22 см с разрешением 1 мм.

При проведении измерений на *ЛКТ-5* необходимо выполнить следующие операции.

1. Ознакомиться с работой электронных часов (4) и установить режим "*секундомер*" кнопкой "*MODE*". В этом режиме на экране дисплея мигает надпись "*SAN ... SAT*".

2. Собрать схему для проведения эксперимента.

2.1. Соединить баллон (штуцер (5)) с водяным манометром (штуцер *M*(6)) силиконовым шлангом.

2.2. Соединить силиконовым шлангом выход из баллона (штуцер (7)) с капилляром *ДР1* (8) или *ДР2* (12).

2.3. Присоединить резиновую грушу к штуцеру (11).

3. Убедиться, что уровень воды в манометре соответствует нулевой отметке шкалы при открытом баллоне (вертикальном положении "*ОТКР.*" крана *К3*(1)). В случае необходимости корректировки уровня обратиться к лаборанту.

4. Закрывать баллон краном *К3* (1), поставив его в горизонтальное положение "*ЗАКР*".

5. Накачать воздух в баллон.

5.1. Закрывать кран *К2* (9) вращением ручки на панели по часовой стрелке до упора. При этом перекрывается выход баллона через капилляр.

5.2. Открыть входной кран *К1* (10), повернув его на несколько оборотов против часовой стрелки.

5.3. Накачать воздух в баллон резиновой грушей через штуцер (11), следя за показаниями манометра и медленно повышая давление в баллоне до значения 200-220 мм водяного столба по отношению к атмосферному давлению и следя за показаниями манометра. Перекрывать кран *К1* (10), вращая его ручку по часовой стрелке до упора, и выждать 1-2 минуты. Показания манометра не должны заметно изменяться со временем.

6. Снять зависимость давления в баллоне от времени.

6.1. Остановить секундомер кнопкой "*ADVANCE*" и сбросить его показания кнопкой "*SET*". На экране должно появиться значение "0-0000".

6.2. Открыть кран *К2* (9), при этом воздух начнет выходить из баллона через капилляр в атмосферу и показания манометра (2) будут уменьшаться. При подходе давления к выбранному значению  $\Delta P_{нач}$  (можно взять  $\Delta P_{нач}=180$  мм водяного столба) включить секундомер кнопкой "*ADVANCE*".

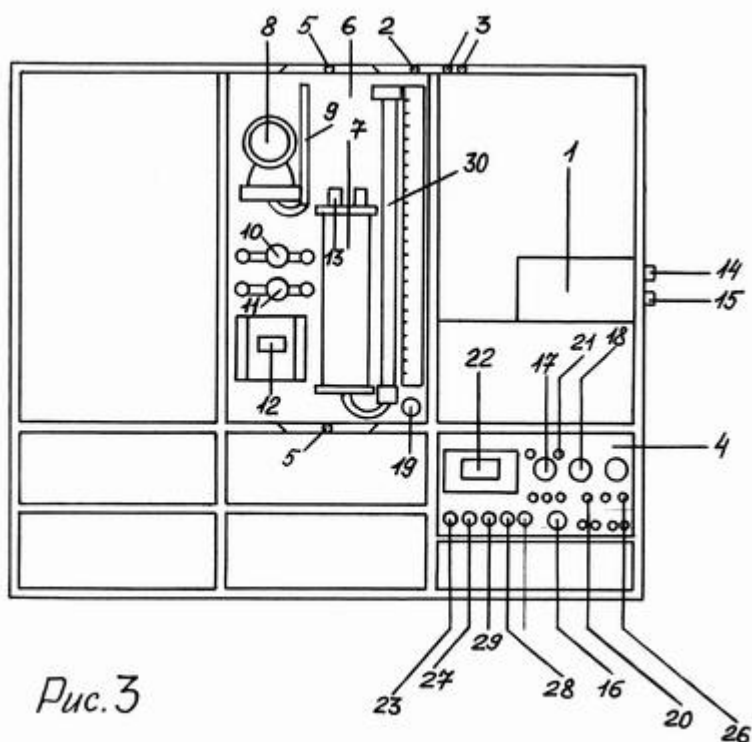


6.3. При достижении столбиком манометра первого заданного значения  $\Delta P$  (160 мм. водяного столба, см. Таблицу в разделе “Обработка результатов измерений”) зафиксировать показания секундомера кнопкой “SET” и записать их в таблицу, затем снова нажать “SET”, зафиксировать второе значение, и т.д. Всего необходимо зафиксировать 8-10 значений давления и соответствующих значений времени.

7. Повторить последовательность операций пп. 5,6 не менее пяти раз сначала для капилляра  $DP1$  (8), а затем для капилляра  $DP2$  (12), предварительно соединив его с выходом баллона (штуцер (7)) силиконовым шлангом.

При использовании капилляра с большим значением радиуса давление в баллоне падает довольно быстро, поэтому можно не фиксировать показания секундомера для разности давлений  $\Delta P > 150$  мм. водяного столба. При скачкообразном изменении показаний манометра во время истечения воздуха через капилляр повторить опыт, предварительно несколько раз повысив и сбросив давление в манометре при помощи резиновой груши.

**ЛКТ-2.** Элементы комплекса ЛКТ-2 размещены в трех ярусах



каркаса (рис. 3). Нижний ярус — служебный. В него встроены приборы и размещаются блоки, неиспользуемые в данный момент, и ящики для принадлежностей, которые вдвигаются в каркас по направляющим. В среднем ярусе находятся: компрессор, блок баллонов и некоторые

функциональные модули. Нужные для работы блоки устанавливаются вертикально в среднем ярусе на штырях двух балок, ограничивающих рабочую зону сверху и снизу. Блоки закрепляются гайками, навинчивающимися на штыри.

На задней стенке установлены розетки электропитания (сеть  $220\text{ В}$ ). На правой боковине (с внутренней стороны) установлена клемма заземления.

Верхний ярус каркаса — полка, на которой размещается дополнительное оснащение.

*Компрессор (1)* предназначен для создания потока воздуха с напором до  $30\text{ кПа}$  и расходом до  $90\text{ мл/с}$ . Компрессор снабжен балластным объемом  $0.65\text{ л}$  для сглаживания пульсаций давления.осушитель представляет собой баллончик с силикагелем, удерживаемый пружиной. После балластного объема и осушителя воздух поступает на штуцер, установленный на передней верхней балке каркаса и обозначенный “К” (2).

Два блока баллонов содержат по два баллона объемом  $1.06\text{ л}$  каждый. Выходы блоков выведены на штуцеры на верхней передней балке каркаса и обозначены “Б” (3).

Измерительная система *ИСТ-2 (4)* занимает одну секцию нижнего этажа каркаса. Она служит для электропитания нагревателей, управления температурой изучаемых объектов (в частности — термостатирования) и т.д. Измерение температуры осуществляется при помощи датчиков, представляющих собой полупроводниковые диоды. При протекании через диод фиксированного тока в прямом направлении напряжение на нем практически линейно зависит от температуры. Система *ИСТ-2* задает ток и измеряет напряжение на диоде, а затем преобразует это напряжение так, чтобы показания цифрового индикатора давали значения температуры с разрешением  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Перед проведением измерений на комплексе *ЛКТ-2* должен быть установлен вертикально на штырях и закреплен гайками (5) блок “ГАЗ-ЖИДКОСТЬ” (6). На нем расположены: реометр (7) -- устройство для измерения расхода газа, манометр (8) на  $300\text{ мм.рт.ст.}$  ( $40\text{ кПа}$ ) с разветвителем (9), два крана *K1(10)* и *K2(11)* со штуцерами и электронные часы (12). Рабочие баллоны (3) соединяются силиконовыми шлангами со следующими элементами установки: капилляром (13), разветвителем манометра (9) и выходом компрессора (2). Схема установки приведена на рис. 3. Сборка схемы выполняется лаборантом.

При проведении измерений на *ЛКТ-2* необходимо выполнить следующие операции.

1. Ознакомиться с устройством комплекса и расположением его основных узлов (компрессора, измерительной системы *ИСТ-2* и пр.)

2. Ознакомиться с работой электронных часов (12) и установить режим "секундомер" кнопкой "MODE". В этом режиме на экране дисплея мигает надпись "SAN ... SAT". В модели секундомера на ЛКТ-2 средняя кнопка "Δ Δ" объединяет функции "SET" и "ADVANCE". Нажатие на левый край кнопки "Δ Δ" соответствует "SET", на правый — "ADVANCE".

3. Накачать воздух в баллоны.

3.1. Закрывать кран K2 (11), вращая его по часовой стрелке до упора, при этом перекрывается выход баллонов через капилляр.

3.2. Открыть кран K1(10), вращая его против часовой стрелки на несколько оборотов, при этом баллоны соединяются с компрессором

3.3. Поставить регулятор (14) компрессора в крайнее положение, вращая его против часовой стрелки до упора, обеспечив минимальный начальный напор воздуха. Включить компрессор тумблером (15) и, следя за показаниями манометра, накачать в баллоны воздух до давления приблизительно 180-200 мм.рт.ст. При необходимости увеличить мощность работы компрессора регулятором (14).

3.4. Закрывать кран K1 (10) и выключить компрессор. Показания манометра не должны меняться с течением времени.

4. Снять зависимость давления в баллонах от времени.

4.1. Остановить секундомер кнопкой "ADVANCE" (нажатием на правый край кнопки "Δ Δ") и сбросить его показания кнопкой "SET" нажатием на левый край кнопки "Δ Δ"). На экране должно появиться значение "0-0000".

4.2. Открыть кран K2 (11), при этом воздух начнет выходить из баллонов через капилляр в атмосферу и показания манометра (8) будут уменьшаться. При подходе давления к выбранному значению  $\Delta P_{нач}$  (можно взять  $\Delta P_{нач}=160$  мм.рт.ст. включить секундомер кнопкой "ADVANCE" (нажатием на правый край кнопки "Δ Δ").

4.3. При достижении столбиком манометра первого заданного значения  $\Delta P^*$ ) (140 мм.рт.ст. см. Таблицу в разделе "Обработка результатов измерений") зафиксировать показания секундомера кнопкой "SET" (нажатием на левый край кнопки "Δ Δ") и записать их в таблицу, затем снова нажать "SET", зафиксировать второе значение, и т.д. Всего необходимо зафиксировать 8-10 значений давления и соответствующих значений времени.

5. Операции пп. 3-4 проделать не менее пяти раз сначала при комнатной температуре, а затем при температуре 60-100 °С. Для того, чтобы нагреть воздух в полости реометра, необходимо:

5.1. Соединить кабелем гнездо (15) нагревателя реометра с гнездом (16) измерительной системы ИСТ-2.

5.1. Включить измерительную систему ИСТ-2 тумблером (19).

---

<sup>\*)</sup> Движение газа в капилляре становится ламинарным при  $\Delta P \leq 100$  мм.рт.ст.

5.2. Задать требуемую температуру регулятором "ТЕМПЕРАТУРА" (17), и напряжение нагревателя примерно 14-16 В регулятором "НАГРЕВ" (18) (напряжение контролируется по цифровому индикатору (22) при нажатой кнопке (28)).

5.3. Включить нагреватель тумблером (20). При достижении заданной температуры система перейдет в режим термостатирования и загорится красный индикатор (21). После этого можно проводить измерения. Значение температуры в градусах Цельсия считывается с цифрового индикатора (22) при нажатой кнопке T1(23).

По окончании измерений выключить нагреватель и питание измерительной системы ИСТ-2.

**ЛКТ-10.** Элементы комплекса ЛКТ-10 (баллоны, весы, манометр) смонтированы на плите-основании (рис.4). При проведении измерений на ЛКТ-10 необходимо выполнить следующие операции.

1. Ознакомиться с работой электронных часов и установить режим "секундомер" кнопкой "MODE". В этом режиме на экране дисплея мигает надпись "SAN ... SAT". В модели секундомера на ЛКТ-10 средняя кнопка "Δ Δ" объединяет функции "SET" и "ADVANCE". Нажатие на левый край кнопки "Δ Δ" соответствует "SET", на правый — "ADVANCE".

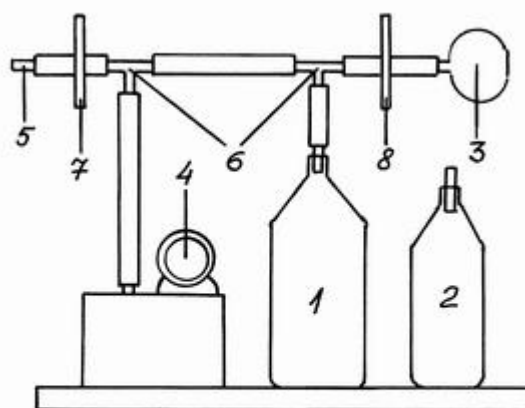


Рис. 4

2. Соединить силиконовыми шлангами при помощи тройников (6) баллон (1), резиновую грушу (3), манометр (4) и капилляр (5) так, как показано на рис.4.

3. Перекрыть капилляр зажимом (7), накачать в баллон воздух до разности давлений  $\Delta P_{нач} \approx 180-200$  мм.рт.ст. перекрыть зажимом (8) шланг от резиновой груши.

4. Снять зависимость давления в баллоне от времени.

4.1. Остановить секундомер кнопкой "ADVANCE" (нажатием на правый край кнопки "Δ Δ") и сбросить его показания кнопкой "SET" (нажатием на левый край кнопки "Δ Δ"). На экране должно появиться значение "0-0000".

4.2. Открыть капилляр, ослабив зажим (7), при этом воздух начнет выходить из баллона через в атмосферу и показания манометра (4) будут уменьшаться. При подходе давления к выбранному значению  $\Delta P_{нач}$

(можно взять  $\Delta P_{нач}=160$  мм.рт.ст.) включить секундомер кнопкой "ADVANCE" (нажатием на правый край кнопки "Δ Δ").

4.3. При достижении столбиком манометра первого заданного значения  $\Delta P$  (см. Таблицу в разделе "Обработка результатов измерений") зафиксировать показания секундомера кнопкой "SET" (нажатием на левый край кнопки "Δ Δ") и записать их в таблицу, затем снова нажать "SET", зафиксировать второе значение, и т.д. Всего необходимо зафиксировать 8-10 значений давления и соответствующих значений времени.

5. Операции пп. 3-4 проделать не менее пяти раз.

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Примерный вид таблицы, в которую заносятся экспериментальные данные, может быть следующим:

$\Delta P$ <i>мм. вод. ст.</i> <i>(ЛКТ-5)</i>	$\Delta P$ <i>мм. РТ. ст</i> <i>(ЛКТ-2. ЛКТ-10)</i>	$t_1$ <i>(мин-сек)</i>	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$\langle t \rangle$	$\ln(\Delta P/\Delta P_{нач})$
200  <i>(<math>\Delta P_{нач}</math>)</i>	160	0-00.00	...	...	...	...	...	0
180	150							
160	140							
140	130							
120	120							
100	110							
80	100							
60	90							
40	80							
20	70							
	60							
	50							
	40							
<i>Угловой коэффициент (тангенс наклона) A=...</i>								
<i>Коэффициент вязкости <math>\eta = \dots</math> (Па·с)</i>								

*Капилляр  $L_0 = \dots$  мм,  $D_0 = \dots$  мм, Баллон  $V_0 = \dots$  л, Температура  $T = \dots$  К*

Диаметр  $D_0$  и длина  $L_0$  используемых капилляров, а также объем баллонов  $V_0$  приводятся в приложении к экспериментальной установке. Для обработки результатов необходимо:

- для каждого значения  $\Delta P$  найти среднее значение времени  $\langle t \rangle = \sum t_n / n$ , при котором оно достигалось ( $n=5$ );

- построить график зависимости  $\ln(\Delta P/\Delta P_{нач})$  от времени  $\langle t \rangle$ ;

-выделить линейные участки графика, определить область ламинарного течения воздуха. Для данных, снятых при давлениях  $\Delta P \leq 200 \text{ мм.рт.ст.}$  (на установках ЛКТ-2 и ЛКТ-10),

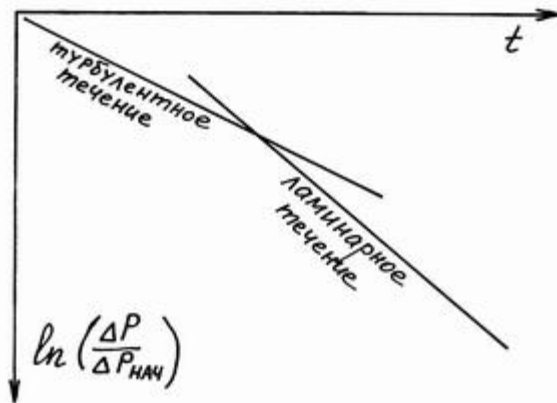


Рис. 5

линейных участков будет два. Один из них соответствует турбулентному течению воздуха (для значений  $\Delta P$ , превышающих приблизительно  $100 \text{ мм.рт.ст.}$ ), а другой — ламинарному (для более низких перепадов давления). Точка излома графика будет соответствовать изменению типа течения (рис.5);

- рассчитать коэффициент вязкости  $\eta$  по формуле (9) через тангенс  $A$  угла наклона прямой,

соответствующей участку ламинарного течения;

- сравнить значения коэффициента вязкости, полученные при разных температурах, объяснить результат (для данных, снятых на установке ЛКТ-2).

Расчет углового коэффициента  $A$  можно провести методом наименьших квадратов.

## Вопросы для самопроверки

1. В каких случаях в жидкостях и газах возникают силы внутреннего трения (силы вязкости)?
2. Запишите формулу, связывающую силу  $F$  внутреннего трения с модулем градиента скорости  $|dv/dr|$  и площадью  $S$  соприкасающихся слоёв жидкости или газа (формулу Ньютона). Дайте определение коэффициента вязкости  $\eta$ .
3. Как связано внутреннее трение в газах с упорядоченным и хаотическим (тепловым) движением молекул газа?
4. Как изменяется вязкость газов с увеличением температуры?
5. Какое течение газа по трубке называется ламинарным и стационарным?
6. В каких случаях газ можно считать несжимаемым?
7. Как связан расход газа  $\theta$  при его течении по капилляру с разностью давлений  $\Delta P$  на концах этого капилляра (формула Пуазейля)?
8. Как зависит скорость  $v$  течения газа по капилляру круглого сечения от расстояния  $r$  до его оси? Изобразите на рисунке несколько векторов скорости течения для разных расстояний от оси капилляра.
9. Опишите принцип действия установок ЛКТ-2, ЛКТ-5, ЛКТ-10.

10. Какой график необходимо построить на основе экспериментальных данных (т.е. какие величины и какой размерности следует отложить по осям  $OX$  и  $OY$ )? Как определить коэффициент вязкости  $\eta$  воздуха из полученной зависимости? Записать расчётные формулы для тангенса  $A$  угла наклона соответствующей прямой и коэффициента вязкости  $\eta$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Д. В. Белов. Механика, М.: Физический факультет МГУ, 1998, глава VI – Элементы гидродинамики, § 29 – Движение вязкой жидкости.
2. И. В. Савельев. Курс общей физики, книга 3 "Молекулярная физика и термодинамика", М.: Наука, Физматлит, 1998, глава 7, § 7.5 "Вязкость газов".