

010705. Определение вязкости воздуха методом истечения из капилляра.

Цель работы:

- Исследовать явление вязкости газов;
- Изучить метод определения коэффициента динамической вязкости, основанный на истечении газа из капилляра.
- Определить по полученным данным коэффициент динамической вязкости воздуха, длины свободного пробега молекул и числа Рейнольдса.

Требуемое оборудование:

1. Электронный блок БЛТ2
2. Измерительная камера для БЛТ2

Краткое теоретическое введение

Основное положение молекулярно-кинетической теории сводится к тому, что молекулы газа движутся хаотически. Скорость движения молекул определяет тепловое состояние газа. В процессе своего движения молекулы соударяются друг с другом и со стенками сосуда. Траектория движения частиц является зигзагообразной, состоящей из отдельных прямолинейных отрезков пути (между соударениями). *Средней длиной свободного пробега молекулы λ* называется среднее расстояние, проходимое молекулой между последовательными столкновениями её с другими молекулами.

Рассмотрим направленное движение газа по трубе круглого сечения. Молекулы газа участвуют одновременно в двух движениях: хаотическом тепловом и направленном. Молекулы, оказавшиеся вблизи стенки, сталкиваются со стенкой, теряют свою энергию и замедляются. За счет теплового движения они переходят в близлежащие слои газа и замедляют их. Вследствие этого скорости направленного движения молекул оказываются различными в разных точках поперечного сечения трубы. Наибольшей скоростью движение совершается в средней части сечения трубы (рис.1), а по мере приближения к стенкам скорость убывает.

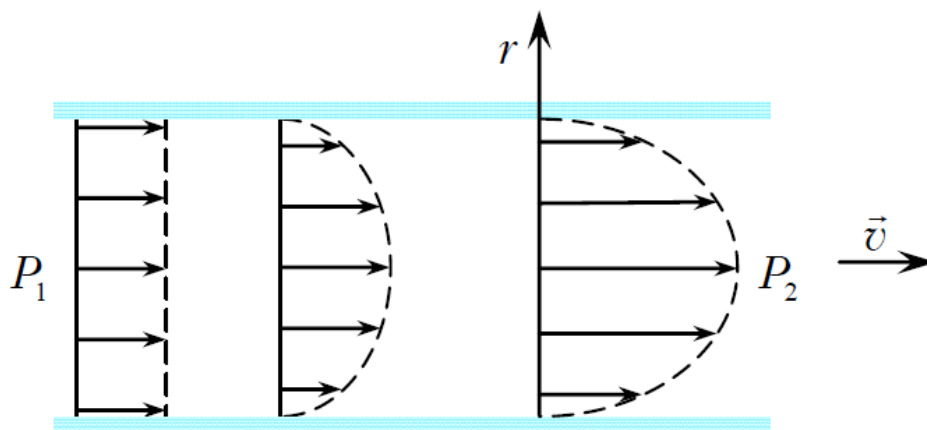


Рис. 1

Весь поток газа можно мысленно разбить на слои цилиндрической формы, движущиеся с различными скоростями. Все молекулы газа, помимо направленного движения, участвуют в тепловом движении, поэтому происходит непрерывный переход молекул из более быстрого слоя в более медленный слой и обратно. В результате столкновения молекулы обмениваются импульсами. Это приводит к возникновению между слоями, испытывающими относительное перемещение, **силы внутреннего трения**. Сила внутреннего трения направлена по касательной к границе между слоями и стремится уравнять скорости движения разных слоев. Свойства газа, связанные с наличием сил внутреннего трения, называют **вязкостью или внутренним трением**.

Сила внутреннего трения между слоями равна:

$$F = \eta \frac{dv}{dx} S_{сл}$$

где $S_{сл}$ - площади соприкосновения слоев,

v - скорость направленного движения газа,

$(\Delta v/\Delta x)$ - градиент скорости,

η - коэффициент пропорциональности, зависящий от рода газа (жидкости), от температуры среды и называемый **коэффициентом динамической вязкости**.

Коэффициент динамической вязкости численно равен силе внутреннего трения, действующей на единичные площади соприкосновения параллельно движущихся слоев газа (жидкости) при единичном градиенте скорости между ними. Единицей вязкости в СИ является Па·с.

При **ламинарном течении** поток газа движется как бы слоями, не перемешивающимися друг с другом, и в пределах слоя скорость направленного движения остается постоянной. Для цилиндрической трубы круглого сечения на некотором расстоянии от конца трубы устанавливается стационарное **распределение скоростей по параболическому закону v**

$$v = \frac{\Delta P}{4\eta L} (R_T^2 - r^2)$$

где ΔP – перепад давления на концах трубы,

L – длина трубы,

R_T – радиус трубы,

r – радиальная координата.

Если газ считать идеальным, то из молекулярно-кинетической теории можно получить выражение для коэффициента динамической вязкости:

$$\eta = \frac{1}{3} \lambda v_{ар} \rho \quad , \quad (1)$$

где $v_{ар}$ – средняя арифметическая скорость теплового движения молекул, равная:

$$v_{ар} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad , \quad (2)$$

где R – универсальная газовая постоянная,

T – абсолютная температура газа

M – молярная масса газа

Объем газа, протекающего через поперечное сечение трубы в единицу времени называется **расходом Q** . При ламинарном течении газа по цилиндрической трубе круглого сечения расход можно определить **формуле Пуазеля** как:

$$Q = \frac{dV}{dt} = \frac{\pi R_T^4 \Delta P}{8\eta L} \quad (3)$$

Если перепад давления увеличивается, скорость течения растет, и движение газа из ламинарного переходит в **турбулентное**, при котором скорости частиц изменяются беспорядочным образом, слои перемешиваются, образуются завихрения (рис. 2).

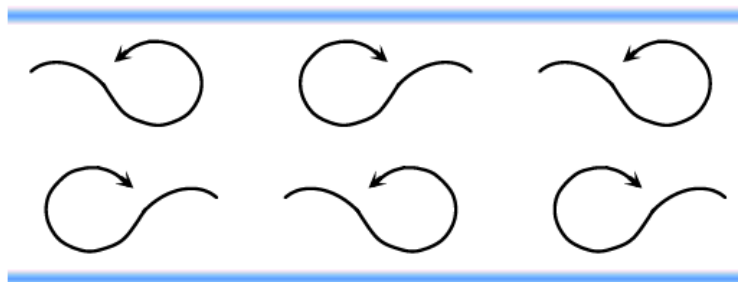


Рис. 2

Для оценки изменения характера движения газа (жидкости) используют безразмерную величину, называемую **числом Рейнольдса**:

$$R_e = \frac{\rho V_{cp} D}{\eta} = \frac{V_{cp} D}{\nu}, \quad (4)$$

где ρ – плотность среды,

V_{cp} – средняя скорость течения

D – характеристический размер (например, диаметр трубы)

$\nu = \eta / \rho$ – коэффициент кинематической вязкости.

Учитывая по формуле (3), что

$$V_{cp} = \frac{Q}{S} = \frac{R_T^2 \Delta P}{8\eta L}$$

где S – площадь поперечного сечения трубы

число Рейнольдса для случая цилиндрической трубы можно рассчитать по формуле:

$$R_e = \frac{\rho R_T^3 \Delta P}{4\eta^2 L} \quad (5)$$

При движении газа в круглой трубе течение является ламинарным, если $R_e < 1000$

Методика проведения эксперимента

Рассмотрим экспериментальную установку, состоящую из баллона объемом V_0 , к которому через клапан подсоединен капилляр. В баллон заканчивается воздух, затем открывается кран, и воздух из баллона вытекает через капилляр в атмосферу. При этом давление в баллоне уменьшается, и перепад давления на концах капилляра $\Delta P = P - P_{атм}$ также непрерывно убывает.

Перепад давления будет зависеть от времени истечения воздуха из капилляра:

$$\Delta P = \Delta P_0 e^{-t/\tau} \quad (6)$$

где ΔP_0 – перепад давления в начальный момент времени $t=0$

τ – **время релаксации**, т.е. время, за которое начальный перепад давления убывает в e раз. Продифференцировав это уравнение по времени, получим:

$$\frac{d(\Delta P)}{dt} = \frac{d}{dt} (\Delta P_0 e^{-t/\tau}) = -\frac{1}{\tau} \Delta P_0 e^{-t/\tau} = -\frac{\Delta P}{\tau} \quad (7)$$

Логарифмируя (6), получим уравнение:

$$\ln(\Delta P) = \ln(\Delta P_0) - \frac{t}{\tau} \quad (8)$$

из которого следует, что график зависимости $\ln(\Delta P)$ от t – прямая линия.

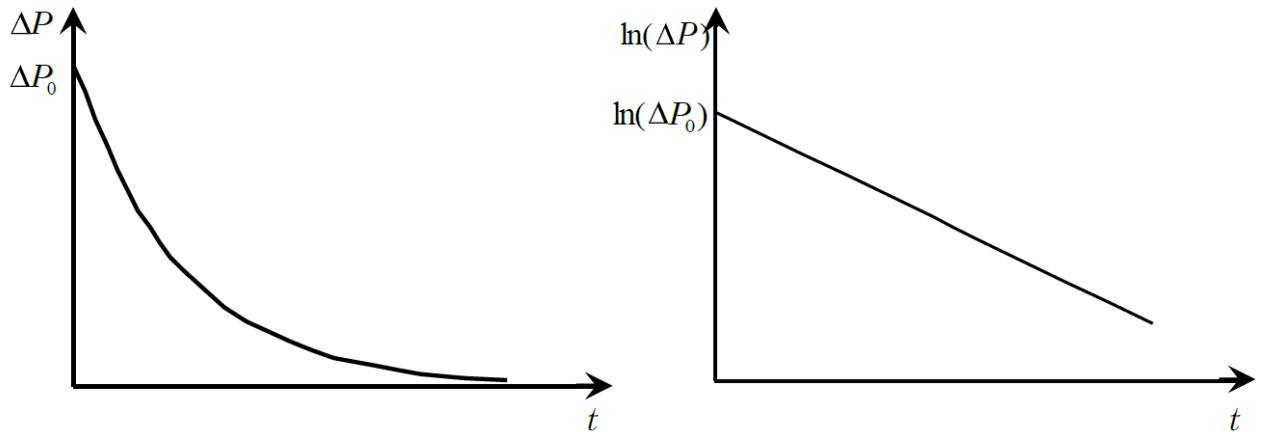


Рис. 3

Истечение воздуха из баллона через капилляр можно рассматривать как процесс изотермического расширения газа с постоянной массой. Тогда согласно [уравнению Менделеева-Клайперона: \$PV=const\$](#) . Продифференцировав это уравнение по времени, получим:

$$P \frac{dV}{dt} + V \frac{dP}{dt} = 0$$

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{V}{P} \frac{dP}{dt}$$

Учтем, что

$$\frac{d(\Delta P)}{dt} = \frac{d(P - P_{\text{атм}})}{dt} = \frac{dP}{dt}$$

получим, используя (3), (7)

$$\eta = \frac{\pi R_1^4 \tau P}{8LV}$$

Поскольку можно принять $P \approx P_{\text{атм}}$ и $V \approx V_0$ (итоговая ошибка не более 20%), то

$$\eta = \frac{\pi R_1^4 \tau P_{\text{атм}}}{8LV_0} \quad (9)$$

Полученная рабочая формула верна только для ламинарного течения газа. Если на графике зависимости $\ln(\Delta P)$ от t наблюдается излом, то это означает, что при высоких перепадах ΔP режим

течения является турбулентным (участок «а» на рис.4). По этому, в дальнейших расчетах следует использовать только данные участка «в».

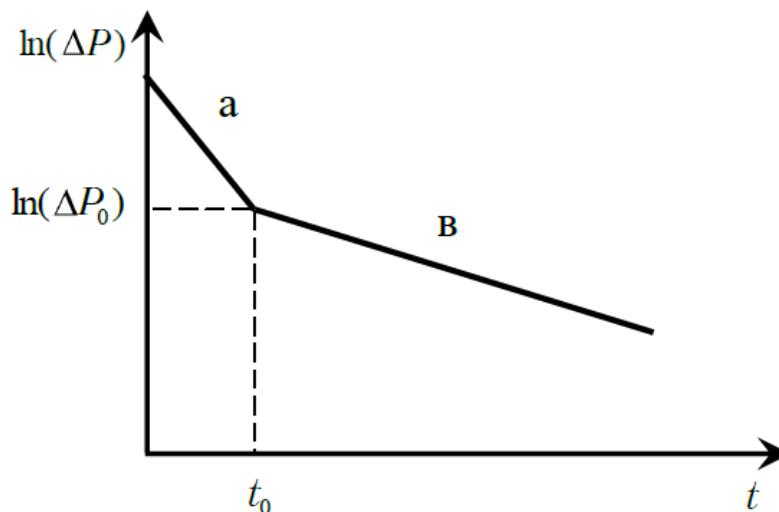


Рис. 4



Все измерения проводятся при помощи блока для определения термодинамических характеристик воздуха БЛТ2. Этот блок позволяет определять:

- Показатель адиабаты воздуха γ ;
- Динамическую вязкости воздуха методом истечения из капилляра.

Блок состоит из двух модулей:

- электронный блок;
- измерительная камера.

Рис.5

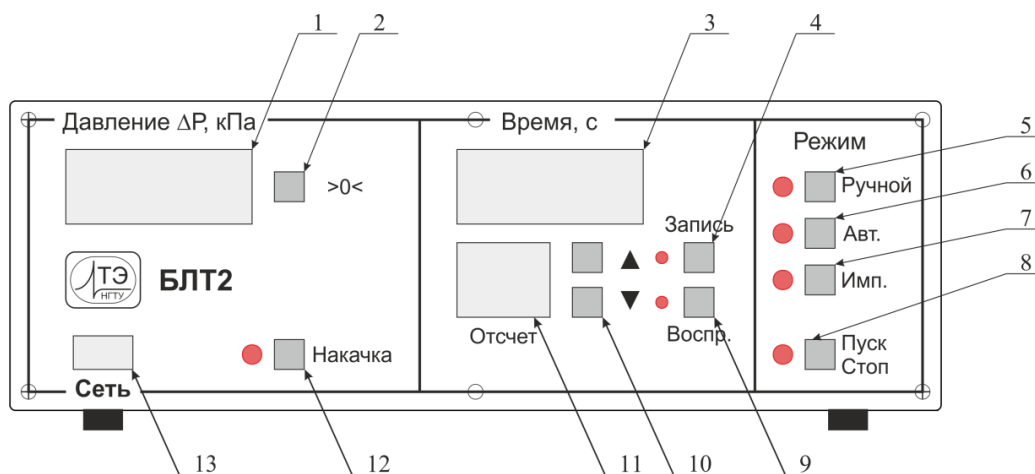


Рис.6

На передней панели электронного блока БЛТ2 (рис.6) расположены:

- 1 – индикатор давления;
- 2 – кнопка коррекции нуля;

- 3– секундомер;
- 4– кнопка «Запись»;
- 5– кнопка выбора режима «Ручной»;
- 6– кнопка выбора режима «Автоматический»;
- 7– кнопка выбора режима «Импульсный»;
- 8– кнопка выбора «Пуск/Стоп»;
- 9– кнопка «Воспроизведение»;
- 10– кнопки выбора отсчетов;
- 11 – индикатор выбора отсчетов;
- 12– кнопка включения компрессора «Накачка».
- 13– кнопка выключателя «Сеть».

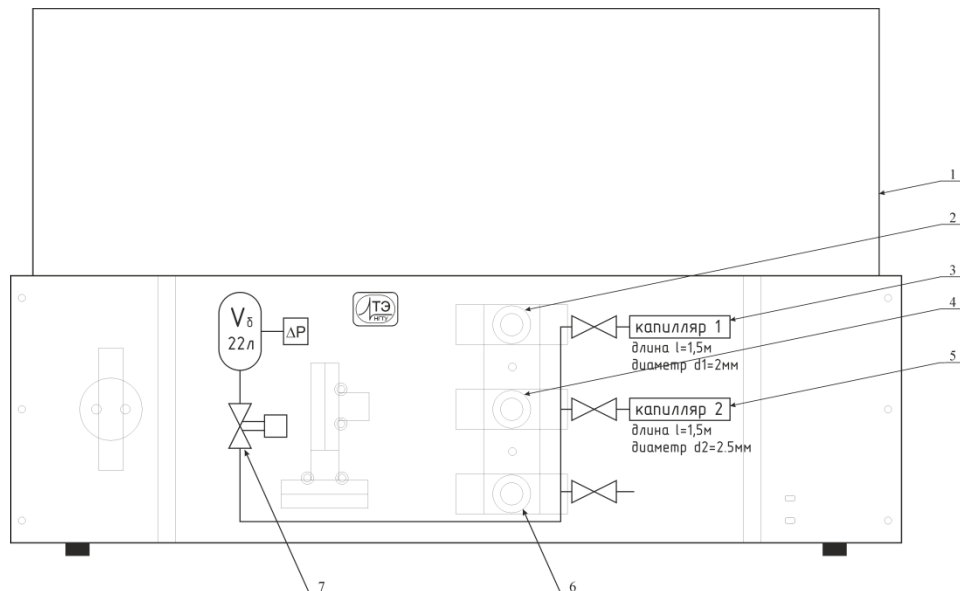


Рис.7

Измерительная камера представлена на рис.7:

- 1– измерительная камера;
- 2– вентиль для соединения капилляра 1;
- 3– капилляр 1;
- 4– вентиль для соединения капилляра 2;
- 5– капилляр 2;
- 6– вентиль для выравнивания давления в камере с атмосферным;
- 7– электромагнитный клапан.

Давление воздуха в камере контролируется дифференциальным датчиком давления, соединенным с камерой трубкой.

Измерения показателя адиабаты производятся в импульсном режиме «Авт.». Ниже представлен алгоритм работы электронного блока БЛТ2 в этом режиме.

1. После нажатия кнопки «Пуск», записывается в память начальное значения давления и открывается ЭМ клапан.

2. Через каждые 0,3 кПа происходит запись очередных отсчетов давления и времени в автоматическом режиме.

3. После повторного нажатия кнопки «Пуск» прибор переходит в режим ожидания

4. Просмотр отсчетов записей осуществляется в режиме ожидания. Для начала просмотра нажмите кнопку «Воспроизведение» 9. С помощью кнопок выбора отсчетов 10 и индикатора 11 осуществляется просмотр записей.

Рекомендуемое задание

1. Нажмите кнопку 6 выбора режима «Авт.». Откройте в измерительной камере вентиль 6 для выравнивания давления с атмосферным.
2. Нажмите в приборе кнопку 2 коррекции нуля.
3. Нажмите кнопку 12 включения компрессора «Накачка». После завершения накачки компрессор автоматически выключится. Выждите 2-3 минуты, пока установится постоянное дифференциальное давление ΔP_0 .
4. Нажмите кнопку 8 «Пуск».
5. Выждите 2 мин. Нажмите повторно кнопку «Пуск».
6. Для просмотра результатов измерения нажмите кнопку «Воспроизведение». Затем стрелками выберите требуемый отсчет. Индикаторы 1 и 3 покажут значения давления и температуры соответственно для выбранного отсчета.
7. Вычислите величины $\ln(\Delta P)$. Постройте график зависимости $\ln(\Delta P)$ от t и убедитесь, что он представляет собой прямую линию.
8. Постройте график зависимости ΔP от времени. По графику найдите время релаксации, соответствующее перепаду давления $\Delta P_{\tau} = \Delta P/e$.
9. Вычислите коэффициент динамической вязкости по формуле (9). Радиус капилляра, его длина и объем баллона указаны на установке. Атмосферное давление принять равным 10^5 Па.
10. Вычислите коэффициент кинематической вязкости $\nu = \eta/\rho$, выбрав плотность воздуха из таблицы 1.
11. Вычислите число Рейнольдса, используя формулу (5).
12. Вычислите, используя формулу (1), среднюю длину свободного пробега молекул.
13. Подключите вентилем 4 второй капилляр. Проведите аналогичные опыты и вычисления п.п. 1 - п.п. 12
14. Сравните полученные данные с табличными. Сделайте выводы.

Таблица 1

Температура, °С	Плотность, кг/м ³	Динамическая вязкость, 10 ⁻⁵ Па·с
0	1,293	1,71
5	1,269	1,73
10	1,247	1,76
15	1,225	1,80
20	1,204	1,82
25	1,184	1,85
30	1,165	1,86
40	1,127	1,87
50	1,109	1,95
60	1,060	1,97
70	1,029	2,03
80	0,9996	2,07
90	0,9721	2,14
100	0,9461	2,17