

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

**МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА:
ЧАСТЬ 2. ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА**

Практикум для вузов

Составители:
В.И. Кукуев,
В.В. Чернышев,
И.А. Попова.

ВОРОНЕЖ
2009

Утверждено научно-методическим советом физического факультета
22 января 2009 года, протокол № 1.

Практикум подготовлен на кафедре общей физики физического факультета
Воронежского государственного университета.

Рекомендуется для студентов физического факультета 1 курса д/о и 2 курса
в/о. Для специальностей: 010701 (010400) – Физика, 010803 (014100) –
Микроэлектроника и полупроводниковые приборы, 010801 (013800) –
Радиофизика и электроника.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА
МЛ-2/1

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ
ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА**

Цель работы – измерение коэффициента внутреннего трения глицерина.

ВВЕДЕНИЕ

Внутреннее трение, или вязкость – это свойство, благодаря которому происходит выравнивание скоростей различных слоев жидкости или газа. При ламинарном течении сила внутреннего трения дается формулой Ньютона:

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

где S – площадь соприкосновения двух соседних слоев;

$\frac{dV}{dx}$ – градиент скорости вдоль оси ox , перпендикулярной направлению движения жидкости,

η – множитель пропорциональности, зависящий от вида жидкости и ее температуры и называемый коэффициентом внутреннего трения (или коэффициентом вязкости). Вязкость жидкостей резко уменьшается при повышении температуры.

Метод Стокса основан на явлении падения маленького шарика в вязкой жидкости. Слой жидкости, граничащий с поверхностью шарика, прилипает к нему и движется ее скоростью шарика. Следующие слои также приходят в движение, но скорости их уменьшаются по мере удаления от шарика. Таким образом, при вычислении силы сопротивления, действующей на шарик, нужно рассматривать не трение шарика о жидкость, а трение слоев жидкости друг о друга. Стокс показал, что если при движении шарика в безграничной жидкости течение слоев ламинарно, то эта сила может быть найдена по формуле:

$$f = 6\pi\eta rV , \quad (2)$$

где r – радиус шарика;

V – его скорость.

Кроме силы сопротивления f , на шарик действует сила тяжести mg и сила Архимеда Q . Движение будет ускоренным лишь вначале. С возрастанием скорости растет сила f , с некоторого момента наступает равновесие сил. Уравнение равновесия имеет вид:

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{ш} g - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{ж} g - 6\pi\eta rV = 0 , \quad (3)$$

где $\rho_{ш}$ и $\rho_{ж}$ – плотности шарика и жидкости соответственно.

Отсюда

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{gr^2}{V} (\rho_{ш} - \rho_{ж}) \quad (4)$$

Скорость равномерного движения можно найти, как $V = l/t$, где l – длина некоторого отрезка, на котором движение равномерно, t – время движения. Подставив это в формулу (4), имеем:

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{gr^2 t}{l} (\rho_{ш} - \rho_{ж}) \quad (5)$$

Влияние боковых стенок сосуда можно учесть, вводя в выражение (5) поправку Ладенбурга. Для цилиндрического сосуда радиуса R

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{gr^2 t (\rho_{ш} - \rho_{ж})}{l (1 + 2,4 \frac{r}{R})}$$

ЭКСПЕРИМЕНТ

Приборы и принадлежности: цилиндрический сосуд с глицерином, секундомер, измерительный микроскоп ММИ-2, дробь.

Установка представляет собой длинный цилиндрический сосуд, наполненный исследуемой жидкостью (рис. 1). В верхней крышке сосуда сделано отверстие, в которое опускают шарики. За цилиндром расположена шкала, позволяющая отсчитать отрезок l , между горизонтальными рисками **A** и **B**, в моменты прохождения которых шариком следует включать и выключать секундомер. Диаметр шарика измеряется микроскопом ММИ-2, общий вид которого представлен на рис. 2.

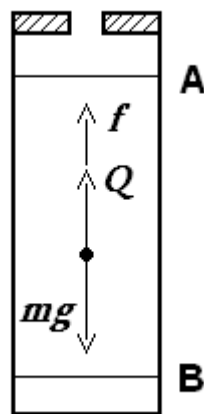


Рис. 1. Цилиндрический сосуд с исследуемой жидкостью.

$$R = (3,125 \pm 0,025) \text{ см.}$$

На чугунном основании смонтирован измерительный стол 1 с микрометрическими винтами поперечного 2 и продольного 3 перемещений стола и колонки 4, по направляющим которой при помощи маховичков 5 и 6 перемещается кронштейн 7 с микроскопом. В задней стенке основания смонтировано осветительное устройство. Измерительный стол установлен на направляющих и может перемещаться в двух взаимно перпендикулярных направлениях при помощи микрометрических винтов 0,005 мм. Шаг винта 1 мм. В верхней части стола имеется предметное стекло 8, на которое кладут

шарики. Внутри окулярной головки 9 имеется стеклянная пластина со штриховой сеткой, которая наблюдается в окуляр микроскопа.

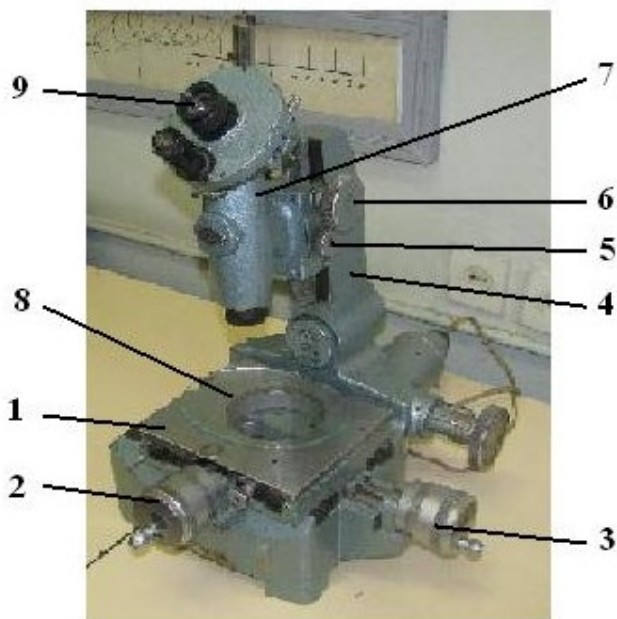


Рис. 2. Общий вид микроскопа ММИ-2.

ИЗМЕРЕНИЯ

1. Включить микроскоп в сеть, добиться резкого изображения штриховой сетки вращением головки окуляра.
2. Положить шарик на предметное стекло, получить его резкое изображение вращением винта 5.
3. Действуя микрометрическими винтами 2 и 3, привести шарик в положение «а» (рис. 3). Произвести отсчет n_1 по барабану поперечного микровинта 3.
4. С помощью этого же микровинта переместить измерительный стол с шариком в положение «б» (рис. 3). Сделать отсчет n_2 по барабану микровинта 3.
5. Вычислить поперечный диаметр шарика $d_1 = n_1 - n_2$.
6. Действуя винтами 2 и 3 добиться положения шарика «в» (рис. 3). Сделать отсчет m_1 по барабану продольного микровинта 2.
- 7.

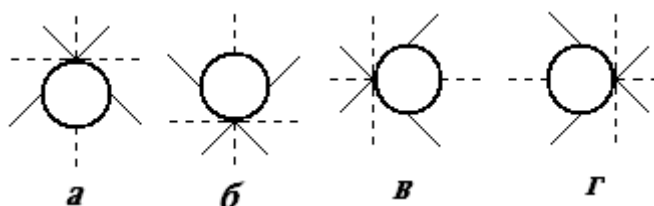


Рис. 3. Изображение шарика в окуляре микроскопа ММИ-2.

8. С помощью того же микровинта переместить измерительный столик так, чтобы шарик принял положение «г». Произвести отсчет m_2 .

9. Найти продольный диаметр $d_2 = m_1 - m_2$.
10. Вычислить средний диаметр $\langle d \rangle = (d_1 + d_2)/2$.
11. Измерить время падения шарика между рисками А и В (рис. 1). Расстояние l между рисками задается преподавателем.
12. Опыт проделать для 10 шариков, записывая данные в таблицу.

Таблица

№	n_1 , мм	n_2 , мм	d_1 , мм	m_1 , мм	m_2 , мм	d_2 , мм	$\langle d \rangle$, мм	t , с	η , Па·с	$\langle \eta \rangle$, Па·с

13. Рассчитать на компьютере коэффициенты вязкости глицерина для каждого из 10 опытов, вводя $\langle d \rangle$ (в метрах) и t для каждого шарика.
14. Продолжая расчет, найти $\langle \eta \rangle$ и его погрешность. Так как условия эксперимента не воспроизводятся (опыты проводятся с различными шариками), погрешность коэффициента вязкости следует вычислять, подходя к $\eta_1 \dots \eta_{10}$ как к результатам прямых измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кикоин А.К. Молекулярная физика / А.К. Кикоин, И.К. Кикоин. – М.: Наука, 1976. – 480 с.
2. Стрелков С.П. Механика. – М. – 1975. – С. 138-143.
3. Матвеев А.Н. Механика и теория относительности. – М., 1986. –С. 203-204.
4. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / Под ред. В.К. Ивероновой. – М. , 1967. – С. 226-230.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Внутреннее трение в жидкостях. Формула Ньютона.
2. Коэффициент внутреннего трения, его физический смысл, размерность, зависимость от температуры жидкости.
3. Падение шарика в вязкой среде, предельная скорость падения, время установления предельной скорости.
4. Метод Стокса, его особенности.
5. Как обрабатывают результаты измерений, если условия опыта не воспроизводятся?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА
МЛ-2/2

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ
ЖИДКОСТИ ВИСКОЗИМЕТРОМ ОСТВАЛЬДА**

Цель работы – измерение коэффициента вязкости водных растворов NaCl, изучение температурной зависимости коэффициента вязкости.

ВВЕДЕНИЕ

При ламинарном течении сила внутреннего трения определяется по формуле Ньютона:

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

где S – площадь поверхности соприкасающихся слоев жидкости;
 $\frac{dV}{dx}$ – градиент скорости в направлении, перпендикулярном скорости движения слоев,
 η – коэффициент внутреннего трения (коэффициент вязкости), зависящий от вида жидкости и резко уменьшающийся с ростом ее температуры.

Объем вязкой жидкости (или газа) V , протекающий за время t через капиллярную трубку радиуса R и длины l при ламинарном течении дается формулой Пуазейля.

$$V = \frac{\pi R^4 \Delta P t}{8 \eta l}, \quad (2)$$

где ΔP – разность давлений на концах капилляра.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ

Приборы, служащие для определения коэффициента вязкости, называются вискозиметрами. Вискозиметр Оствальда представляет собой U-образную стеклянную трубку (рис.1), имеющую резервуар 1, ограниченный двумя кольцевыми метками «m» и «n», над которым расположено небольшое расширение 2. Ниже резервуара 1 находится капилляр 3. Более широкое колено трубки имеет резервуар 4 для наполнения вискозиметра жидкостью. Вискозиметр укреплен в штативе и может опускаться в жидкостный термостат (водяную баню) для поддержания постоянной температуры. К узкому колону вискозиметра присоединена резиновая трубка 5.

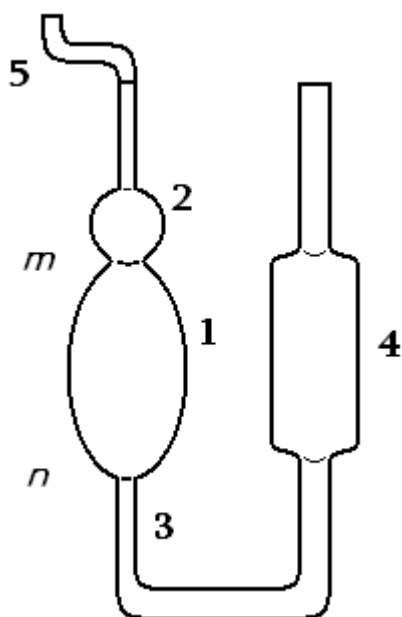


Рис. 1. Вискозиметр Оствальда.

Методика работы основана на измерении времени протекания через капилляр одинакового объема исследуемой жидкости и жидкости сравнения, для которой коэффициент вязкости η_0 является известным. Приравнивая объемы этих жидкостей, получаем по формуле (2)

$$\frac{\pi R^4 \Delta P t}{8 \eta l} = \frac{\pi R^4 \Delta P_0 t_0}{8 \eta l} ,$$

где t и t_0 – времена протекания исследуемой жидкости и жидкости сравнения соответственно;

ΔP и ΔP_0 – разности давлений на концах капилляра при протекании этих жидкостей.

Так как истечение происходит под действием силы тяжести, можно написать $\Delta P / \Delta P_0 \approx \rho / \rho_0$, где ρ и ρ_0 – плотности исследуемой жидкости и жидкости сравнения. Тогда

$$\eta = \eta_0 \frac{\rho t}{\rho_0 t_0} . \quad (3)$$

величины ρ_0 и η_0 берутся из справочной литературы.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Приборы и принадлежности: вискозиметр Оствальда, штатив, водяная баня, электроплитка, мерный цилиндр, резиновая груша, термометр, секундомер, исследуемые растворы.

Задание 1. Определение коэффициентов вязкости водных растворов различной концентрации.

1. Снять вискозиметр вместе с лапкой штатива и промыть сначала проточной, затем дистиллированной водой. Закрепить вискозиметр в штативе вертикально и опустить его в термостат так, чтобы метки находились немного выше уровня воды. Установить температуру 20 °С.
2. Налить в вискозиметр отмеренной мерным цилиндром заданный объем (20-50 см³) дистиллированной воды. Резиновой грушей, надетой на трубку 5, засосать жидкость выше метки «*m*» примерно до половины расширения 2. Снять грушу и измерить время t_0 истечения воды из резервуара 1, включая и выключая секундомер в момент прохождения поверхностью воды меток «*m*» и «*n*» соответственно.
3. Прodelать опыт 5 раз, вычислить $\langle t_0 \rangle$ и его погрешность.
4. В такой же последовательности прodelать измерения времени t истечения всех исследуемых жидкостей. Результаты записывать в таблицу 1.

Таблица 1

Концентрация, %	$t_1, \text{с}$	$t_2, \text{с}$	$t_3, \text{с}$	$t_4, \text{с}$	$t_5, \text{с}$	$\langle t \rangle, \text{с}$	$\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$
0							
5							
10							
15							
20							
25							

5. Рассчитать коэффициенты вязкости всех растворов, записать их совместно с погрешностями измерений. Плотности растворов при 20 °С даны в таблице 2.
6. Построить график зависимости коэффициента вязкости от концентрации раствора NaCl при температуре 20 °С.

Таблица 2

Концентрация, %	5	10	15	20	25
$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	1034	1071	1109	1148	1190

Задание 2. Изучение зависимости коэффициента вязкости 10-процентного раствора NaCl от температуры.

1. Промыть вискозиметр и заполнить его исследуемым 10 % раствором хлорида натрия. Опустить вискозиметр в жидкостный термостат.
2. Включить электроплитку и нагреть воду в термостате на 10 °С, помешивая ее мешалкой. Выключить плитку и выдержать прибор несколько минут для установления теплового равновесия.
3. Измерить 5 раз время истечения жидкости, найти $\langle t \rangle$, определить погрешность.
4. Вычислить η при данной температуре, представить его вместе с погрешностью.

Плотности 10 % раствора NaCl при различных температурах приведены в таблице 3.

Таблица 3

$T, ^\circ\text{C}$	30	40	50	60	70	80
$\rho, \text{кг/м}^3$	1070	1066	1062	1060	1058	1056

5. Нагревая жидкость каждый раз на 10° (до 80°), повторять аналогичные измерения. Все результаты записывать в таблицу 4.

Таблица 4

$T, ^\circ\text{C}$	$t_1, \text{с}$	$t_2, \text{с}$	$t_3, \text{с}$	$t_4, \text{с}$	$t_5, \text{с}$	$\langle t \rangle, \text{с}$	$\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$

6. Построить график зависимости коэффициента вязкости от температуры. Графики выполняются на миллиметровой бумаге.
7. Сформулировать выводы, суммирующие результаты проделанной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кикоин А.К. Молекулярная физика / А.К. Кикоин, И.К. Кикоин. – М.: Наука, 1976. – 480 с.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики / Д.В. Сивухин. – М.: Изд-во МФТИ, 2003. – Т.2: Термодинамика и молекулярная физика. – 576 с.
3. Матвеев А.Н. Молекулярная физика / А.Н. Матвеев. – М.: Высш.шк., 1981. – 400 с.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Механизм внутреннего трения в жидкостях. Физический смысл и размерность коэффициента внутреннего трения.
2. Температурная зависимость коэффициента вязкости жидкости, отличие ее от аналогичной зависимости для газов.
3. Вывод формулы Пуазейля.
4. Устройство и принцип действия вискозиметра Оствальда, методика работы с прибором.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА
МЛ-2/3

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ
РОТАЦИОННЫМ ВИСКОЗИМЕТРОМ ВОЛАРОВИЧА**

Цель работы – изучение вискозиметра РВ-4 и определение коэффициента внутреннего трения жидкости.

ОПИСАНИЕ ПРИБОРА И ВВОДНАЯ ЧАСТЬ

Ротационный вискозиметр РВ-4 конструкции М.П.Воларовича предназначен для измерения коэффициента внутреннего трения в пределах от 1 до 10^5 Пуаз при комнатных температурах. Схема прибора представлена на рис. 1.

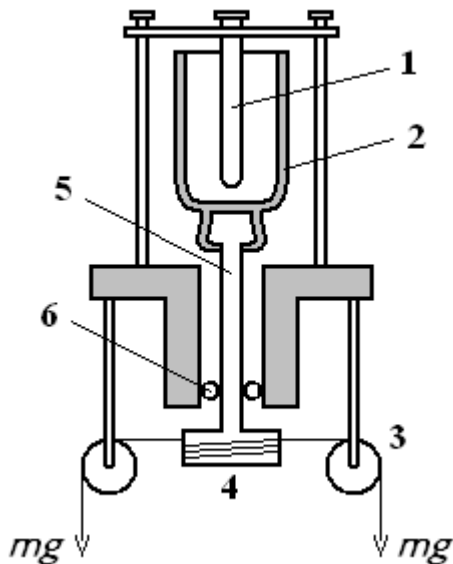


Рис. 1. Схема ротационного вискозиметра Воларовича.

Неподвижный цилиндр 1 расположен внутри полого цилиндра 2. Пространство между цилиндрами заполняется вязкой средой. Цилиндр 2 приводится во вращение посредством грузов, прикрепленных к концам нити, перекинутой через блоки 3 и намотанной на барабан 4, ось которого совпадает с общей осью цилиндров. Вращение от барабана к цилиндру 2 передается через вал 5, насаженный на ось барабана и вращающийся на шарикоподшипнике 6. Прибор устанавливается на высоте не менее 1,5 м, чтобы барабан успел сделать достаточное число оборотов, прежде чем грузы коснутся пола.

В качестве грузов используется обычный разновес от технических весов, накладываемый на чашки, привязанные к нитям. Для пуска и остановки системы имеется тормоз (на рисунке не показан).

Площадь дна внутреннего цилиндра незначительна, и его рабочей поверхностью может считаться только боковая поверхность.

Вращение цилиндра 2 происходит под действием моментов сил натяжения нитей. Препятствуют движению моменты силы внутреннего трения и силы трения в подшипнике. Рассмотрим установившееся движение, когда скорость грузов и угловая скорость Ω барабана и цилиндра 2 постоянны. В этом случае должно иметь место равновесие моментов сил. Момент сил натяжения равен mgR , где m – масса грузов на нитях, R – радиус барабана 4. Момент силы трения в подшипнике может быть найден как m_0gR , где m_0 – масса наименьшей нагрузки, вызывающей вращение системы при отсутствии между цилиндрами вязкой среды.

При вращении цилиндра 2 слой исследуемой жидкости, прилегающий непосредственно к его поверхности, движется вместе с этой поверхностью – их угловые скорости одинаковы. Вследствие вязкости угловая скорость других слоев уменьшается и становится равной нулю у поверхности неподвижного цилиндра. Таким образом, вдоль радиального направления существует градиент угловой скорости $\frac{d\omega}{dr}$, а, следовательно, и линейной $\frac{dV}{dr}$. Сила внутреннего трения, действующая на цилиндрический слой радиуса r , толщиной dr и высотой h , по Ньютону, может быть представлена в виде

$$F = -\eta S \frac{dV}{dr} = -\eta 2\pi r h \cdot r \frac{d\omega}{dr}, \quad (1)$$

где η – коэффициент внутреннего трения, $S=2\pi r h$ – площадь боковой поверхности. Момент этой силы равен

$$M = Fr = -2\pi h r^3 \frac{d\omega}{dr}. \quad (2)$$

Из (2) имеем:

$$M \frac{dr}{r^3} = -2\pi h \eta d\omega. \quad (3)$$

Обозначим r_1 и r_2 – радиусы цилиндров 1 и 2 соответственно.

Интегрируя (3), найдем полный момент силы внутреннего трения. При $r = r_1$ $\omega = 0$, при $r = r_2$ $\omega = \Omega$.

Таким образом:

$$\int_{r_1}^{r_2} M \frac{dr}{r^3} = - \int_0^{\Omega} 2\pi h \eta d\omega.$$

После интегрирования, выразив M , получаем

$$M = -4\pi h \eta \Omega \frac{r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} = -8\pi^2 \eta h N \frac{r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2}, \quad (4)$$

где N – число оборотов системы за 1 с.

Условие равновесия моментов сил:

$$mgR - m_0gR - 8\pi^2\eta hN \frac{r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} = 0. \quad (5)$$

Из (5) можно выразить коэффициент внутреннего трения

$$\eta = \frac{gR(r_2^2 - r_1^2)}{8\pi^2 h r_1^2 r_2^2} \cdot \frac{m - m_0}{N} = K \frac{m - m_0}{N}. \quad (6)$$

В формуле (6) постоянная K зависит только от параметров прибора и глубины h погружения цилиндра 1 в вязкую среду. Из (6) видно, что график зависимости N от m представляет собой прямую линию, угловой коэффициент которой $a = \operatorname{tg}\alpha = K/\eta$.

Отсюда

$$\eta = K \operatorname{ctg}\alpha = \frac{K}{a}. \quad (7)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Приборы и принадлежности: вискозиметр РБ-4, секундомер, разновесы.

Изучив устройство прибора, наливают исследуемую жидкость в цилиндр 2 и погружают в нее цилиндр 1, определяя при этом глубину h погружения малого цилиндра в жидкость.

Нагружают чаши разновесом (1-2 г), освобождают тормоз и измеряют с помощью секундомера время нескольких (5-10) оборотов цилиндра 2. Опыт повторяют 3-5 раз, заносая данные в таблицу. Определяют среднее время и среднее значение величины N .

Повторяют измерения еще с 4-5 нагрузками. Построив график зависимости $N = N(m)$, определяют угловой коэффициент наклона прямой $a = \operatorname{tg}\alpha$ (рис. 2). При этом отрезок, отсекаемый графиком на оси абсцисс, очевидно, равняется величине m_0 .

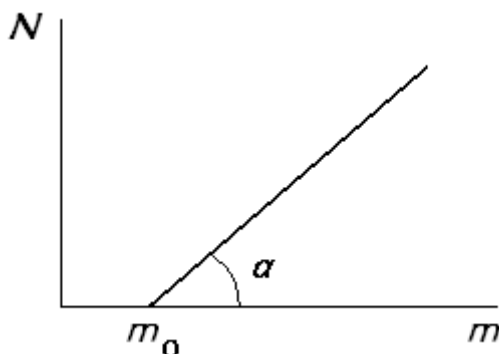


Рис. 2. Зависимость числа оборотов вискозиметра от массы грузов.

Вычислив величину K по формуле (6), находим коэффициент вязкости η по формуле (7).

Примечания:

1. В величины m , кроме суммарной массы разновесок, входят еще массы чашек.
2. Параметры вискозиметров указаны на установках.
3. Максимальная погрешность коэффициента вязкости при работе с вискозиметром РВ-4 составляет 11 % (по паспорту прибора).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кикоин А.К. Молекулярная физика / А.К. Кикоин, И.К. Кикоин. – М.: Наука, 1976. – 480 с.
2. Телесин Р.В. Молекулярная физика / Р.В. Телесин. – М.: Высш.шк., 1973. – 360 с.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сила внутреннего трения, коэффициент внутреннего трения, его физический смысл, размерность.
2. Устройство ротационного вискозиметра, физические основы его работы.
3. Вывод рабочей формула для определения коэффициента вязкости.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА
МЛ-2/4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

МЕТОДОМ НАГРЕТОЙ НИТИ

Цель работы – изучение теплопроводности воздуха как одного из явлений переноса в газах.

ТЕОРИЯ МЕТОДА

Распространение теплоты в газах осуществляется тремя способами: тепловым излучением (перенос энергии электромагнитными волнами), конвекцией (перенос энергии за счет перемещения слоев газа в пространстве из областей с более высокой температурой в области с более низкой температурой) и теплопроводностью.

Теплопроводность – это процесс передачи теплоты от более нагретого слоя газа к менее нагретому за счет хаотичного теплового движения молекул. При теплопроводности осуществляется непосредственная передача энергии от молекул с большей энергией к молекулам с меньшей энергией. Для стационарного процесса, при котором разность температур в слое газа не изменяется со временем, количество теплоты δQ , которая переносится вследствие теплопроводности за время $d\tau$ через поверхность площадью S , перпендикулярную к направлению переноса энергии, в направлении уменьшения температуры, определяется по закону Фурье:

$$\delta Q = -\chi \frac{dT}{dx} S d\tau, \quad (1)$$

где χ – коэффициент теплопроводности; dT/dx – градиент температуры.
Для идеального газа

$$\chi = \frac{1}{3} \rho \langle V \rangle \lambda c_v, \quad (2)$$

здесь ρ – плотность газа;

λ – средняя длина свободного пробега молекулы;

$\langle V \rangle$ – средняя арифметическая скорость теплового движения молекул,

$$\langle V \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}};$$

c_v – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме.

Рассмотрим два коаксиальных цилиндра, пространство между которыми заполнено газом. Если внутренний цилиндр нагревать, а температуру наружного цилиндра поддерживать постоянной, ниже температуры нагревателя, то в кольцевом слое газа возникает радиальный поток теплоты, направленный от внутреннего цилиндра к наружному. При этом температура слоев газа, прилегающих к стенкам цилиндров, равна температуре стенок. Выделим в газе кольцевой слой радиусом r , толщиной dr и длиной L . По закону Фурье (1) тепловой поток $q = \delta Q / d\tau$, т.е. количество теплоты, которая проходит через этот слой за одну секунду, можно записать в виде

$$q = -\chi \frac{dT}{dr} S = -\chi \frac{dT}{dr} 2\pi r L. \quad (3)$$

Разделяя переменные, получим

$$\frac{dr}{r} = -\frac{2\pi\chi L}{q} dT$$

Тогда

$$\int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r} = -\frac{2\pi\chi L}{q} \int_{T_1}^{T_2} dT$$

или

$$\ln \frac{R_2}{R_1} = \frac{2\pi\chi L}{q} (T_1 - T_2), \quad (4)$$

здесь T_1 , R_1 и T_2 , R_2 – соответственно температуры поверхностей и радиусы внутреннего и наружного цилиндров.

Из уравнения (4) получим формулу для определения коэффициента теплопроводности газа:

$$\chi = \frac{q \ln \frac{R_2}{R_1}}{2\pi L (T_1 - T_2)} \quad (5)$$

Формулу (5) получили в предположении, что теплота переносится от внутреннего к наружному цилиндру только благодаря теплопроводности. Это предположение достаточно обосновано, поскольку поток лучистой энергии при невысоких температурах и малом диаметре нагревателя составляет незначительную часть количества теплоты, которая переносится, а конвекция устраняется подбором диаметра наружного цилиндра и его вертикальным расположением в экспериментальной установке.

Внутренним цилиндром может служить тонкая проволока (нить), обычно вольфрамовая, которая нагревается электрическим током. Тогда после установления стационарного режима тепловой поток можно принять равным мощности электрического тока, протекающего через проволоку.

$$q = I_H U_H,$$

где I_H – ток через проволоку; U_H – падение напряжения на проволоке.

Если последовательно с проволокой включить эталонный резистор сопротивлением R_p , то

$$I_H = \frac{U_p}{R_p},$$

и тогда

$$q = \frac{U_p U_H}{R_p}, \quad (6)$$

где U_p – падение напряжения на эталонном резисторе.

Используя равенство (6) в формуле (5), получим

$$\chi = \frac{U_p U_H \ln \frac{D}{d}}{2\pi L R_p \Delta T}, \quad (7)$$

здесь D и d – диаметры наружного цилиндра и проволоки; $\Delta T = T_H - T_T$ – разность температур проволоки и наружного цилиндра (трубки).

Температуру трубки T_T можно принять равной температуре окружающего воздуха.

Для вычисления разности температур ΔT в слое газа напишем формулы, по которым определяют сопротивление проволоки при температуре окружающего воздуха и в нагретом состоянии:

$$\begin{aligned} R_{H.O} &= R_0(1 + \alpha t_0), \\ R_H &= R_0(1 + \alpha t), \end{aligned}$$

где R_0 – сопротивление проволоки при $t = 0$ °С; α – температурный коэффициент сопротивления материала проволоки.

Исключив из этих равенств R_0 , найдем

$$\Delta T = t - t_0 = \frac{R_H - R_{H.O}}{\alpha R_{H.O}} (1 + \alpha t_0).$$

Учитывая, что $R_H = \frac{U_H}{I_H}$, $I_H = \frac{U_P}{R_P}$ и $R_{H.O} = \frac{U_{H.O}}{I_{H.O}}$, $I_{H.O} = \frac{U_{P.O}}{R_P}$, получим

$$\Delta T = \frac{\left(\frac{U_H}{U_P} - \frac{U_{H.O}}{U_{P.O}}\right)(1 + \alpha t_0)}{\frac{U_{H.O}}{U_{P.O}} \alpha}, \quad (8)$$

где U_H , $U_{H.O}$ – падение напряжения на проволоке соответственно в нагретом состоянии и при температуре окружающего воздуха t_0 ; U_P , $U_{P.O}$ – падение напряжения на эталонном резисторе соответственно при нагретой проволоке и при температуре окружающего воздуха t_0 .

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для определения коэффициента теплопроводности воздуха предназначена экспериментальная установка ФПТ1-3, общий вид которой показан на рисунке 1.

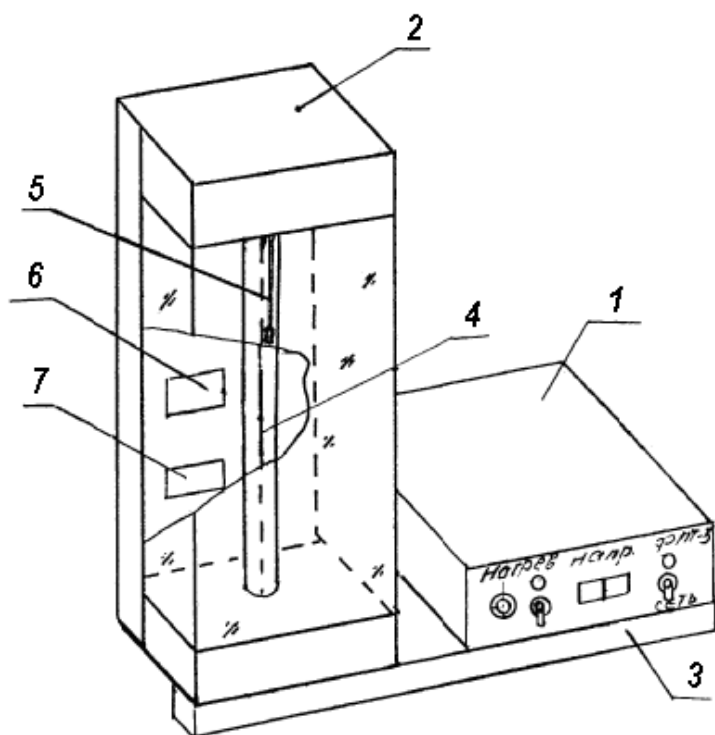


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки ФПТ1-3 для определения коэффициента теплопроводности воздуха методом нагретой нити.
 1 – блок приборный БП-3;
 2 – блок РЭ-3;
 3 – стойка;
 4 – вольфрамовая нить;
 5 – датчик температуры;
 6 – контроллер для измерения температуры;
 7 – контроллер для измерения напряжения.

Рабочий элемент установки представляет собой стеклянную трубку, заполненную воздухом, вдоль оси которой натянута вольфрамовая проволока 4. Температура трубки в ходе эксперимента поддерживается постоянной благодаря принудительной циркуляции воздуха между трубкой и кожухом блока рабочего элемента 2, которая осуществляется с помощью вентилятора, находящегося в блоке рабочего элемента. Температура воздуха в трубке измеряется цифровым термометром 5. Значения падения напряжения на эталонном резисторе U_P и на проволоке U_H измеряются цифровым вольтметром. Значение напряжения на проволоке устанавливается регулятором «Нагрев», который находится на передней панели блока приборов 1. Геометрические размеры рабочего элемента – диаметр трубки D , диаметр проволоки d , длина трубки L , температурный коэффициент сопротивления материала проволоки α указаны на рабочем месте.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить установку тумблером «Сеть». Включить тумблер «Нагрев».
2. Нажать кнопку « U_P » (режим измерения падения напряжения на эталонном резисторе) и с помощью регулятора «Нагрев» установить падение напряжения не более 0,06 В, при котором температура проволоки остается практически неизменной («ненагревающий» ток).
3. Нажать кнопку « U_H » (режим измерения падения напряжения на проволоке) и зарегистрировать значение напряжения.

4. Повторить измерения по п.п. 2-3 для 3-5 значений напряжения $U_{P.O}$. Все результаты занести в таблицу 1.
5. Нажать кнопку « U_P » и с помощью регулятора «Нагрев» установить падение напряжения на эталонном резисторе U_P в диапазоне 0,3 ... 1,5 В.
6. Подождав 2 минуты, что необходимо для стабилизации теплового режима рабочего элемента, нажать кнопку « U_H » и определить падение напряжения на проволоке U_H .
7. Повторить измерения по п.п. 5-6 для 3-5 значений падения напряжения U_P .
8. Результаты занести в таблицу 1.

Таблица 1.

Номер измерения	U_P В	$U_{H.O}$ В	t_0 °С	U_P В	U_H В	ΔT К	χ Вт/(м·К)

9. Установить ручку регулятора «Нагрев» на минимум, отключить тумблер «Нагрев», после чего отключить установку тумблером «Сеть».

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

1. Для каждого измерения по формуле (8) рассчитать разность температур ΔT , а по формуле (7) – коэффициент теплопроводности χ и занести полученные значения в таблицу 1.
2. Найти среднее значение коэффициента теплопроводности воздуха $\langle \chi \rangle$.
3. Оценить погрешность результатов измерения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики / Д.В. Сивухин. – М.: Изд-во МФТИ, 2003. – Т.2: Термодинамика и молекулярная физика. – 576 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики /И.В. Савельев. – М. : Наука, 2003. – Т.2.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Расскажите о возможных способах передачи теплоты.
2. В чем суть явления теплопроводности? Что переносится при теплопроводности?
3. Какая величина называется тепловым потоком? В каких единицах СИ она измеряется?

4. Какой формулой описывается поток теплоты, перенесенной при теплопроводности?
5. Каков физический смысл коэффициента теплопроводности? В каких единицах СИ измеряется эта величина?
6. Напишите формулу для коэффициента теплопроводности идеального газа.
7. Объясните понятие градиента температуры.
8. В чем заключается метод нагретой нити для определения коэффициента теплопроводности газов?
9. Выведите расчетную формулу для определения коэффициента теплопроводности методом нагретой нити.
10. Объясните назначение эталонного резистора в схеме экспериментальной установки.
11. Как определяется разность температур проволоки и наружной трубки в данной работе?
12. Как оценить среднюю длину свободного пробега и эффективный диаметр молекулы газа, используя явление теплопроводности?