Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеративное агентство по образованию
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. А.Н. ТУПОЛЕВА»

Ф.М. ГАЙСИН, Р.Ш. АХМЕТЗЯНОВ,
А.Х. КАРИМОВ, А.Ф. ГАЙСИН

ОБЩАЯ ФИЗИКА

Лабораторный практикум
по молекулярной физике

Рекомендовано к изданию Учебно-методическим центром
КГТУ им. А.Н. Туполева

Казань 2009

УДК 539.19:536:071.1
ББК 22.317 + 22.36

Гайсин Ф.М, Ахметзянов Р.Ш., Каримов А.Х., Гайсин А.Ф.
Общая физика: Лабораторный практикум по молекулярной физике. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2009. 36с.

ISBN 978-5-7579-1302-5

Предназначен для студентов технических университетов и содержит описание шести лабораторных работ: краткие теоретические сведения, описание экспериментальной установки, порядок проведения опытов, методику обработки результатов измерений.

Табл. 4. Ил. 11. Библиогр.: 5 назв.

Рецензенты: докт. техн. нуак, профессор Н.Ф. Кашапов (Казанский государственный технологический университет),
канд. техн. нуак, доцент Р.Х. Зиятдинов (Казанский государственный технологический университет)

ISBN 978-5-7579-1302-5

© Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2009
© Г.Ф. Гайсин, Р.Ш. Ахметзянов, А.Х. Каримов, А.Ф. Гайсин, 2009

Лабораторная работа №1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТЕЙ МЕТОДОМ СТОКСА

Цель работы: Определение динамической вязкости глицерина и трансформаторного масла методом Стокса.

Теоретическая часть

Вязкостью жидкостей называется внутреннее трение между частицами (молекулами), из которых состоит жидкость. Она характеризует явления, происходящие в объеме жидкой фазы (объемные явления). Количественно вязкость оценивается коэффициентом динамической вязкости (η).

Мысленно выделим в объеме жидкости два слоя C_1 и C_2, находящиеся на расстоянии dx друг от друга и отсчитываемом по нормали к направлению скорости. Слои движутся со скоростями $\vec{v}$ и $\vec{v}+d\vec{v}$ (рис.1).

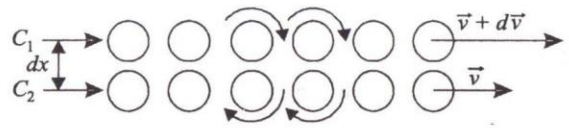

Рис. 1. К определению понятия «вязкость»

Вязкость жидкости – характеристика динамическая и проявляет себя только при движении (течении) жидкости относительно каких-либо тел, либо при движении тел относительно покоящейся жидкости. Вязкость жидкости проявляется при возникновении силы, препятствующей относительному сдвигу (из-за разности скоростей dv соприкасающихся слоев жидкости) относительно друг друга. Слой C_1 действует на слой C_2 с замедляющей силой F, величина которой при малых скоростях (безвихревое, ламинарное течение) пропорциональна градиенту скорости dv/dx и площади контакта слоев S:

$$F = \eta S \frac{dv}{dx} \text{ (формула Ньютона)}, \qquad (1)$$

где F – абсолютное значение силы внутреннего трения между слоями жидкости; η – коэффициент пропорциональности, зависящий от природы жидкости и ее состояния (температуры, давления), от размеров и формы молекул и молекулярной массы, называемый коэффициентом динамической вязкости, а часто и просто вязкостью. За единицу измерения вязкости в системе СИ принята паскаль-секунда (Па·с).

Если коэффициент динамической вязкости жидкостей не зависит от режима течения, то такие жидкости носят название ньютоновских жидкостей (или маловязких). Примеры ньютоновских жидкостей: все чистые (индивидуальные) низкомолекулярные вещества в жидком состоянии, их смеси и истинные растворы в них низкомолекулярных веществ (вода, органические жидкости – спирты, кислоты и др., расплавленные металлы, соли и проч.).

Кроме коэффициента динамической вязкости в гидродинамике широко используется коэффициент кинематической вязкости, определяемый отношением динамической вязкости к плотности жидкости (или газа):

$$\nu = \eta / \rho. \qquad (2)$$

Единицей измерения кинематической вязкости в СИ является $м^2/с$. Представление о величине вязкости некоторых жидкостей дает табл.1Приложения.

Методы определения вязкости

Для определения коэффициента вязкости используются следующие методы:

– метод капилляра (метод Пуазейля);

– метод вращающихся коаксиальных цилиндров;

– метод вращающегося диска;

– метод опускающегося в жидкости сферического тела (метод Стокса);

– метод затухающих колебаний сферы, заполненной жидкостью;

– метод крутильных колебаний стаканчика;

– струнный метод (основанный на скорости затухания колебаний струны в жидкости) и другие методы.

Наиболее точными и распространенными способами измерения вязкости являются метод Стокса и метод капилляра. В настоящей работе используется метод Стокса. В лабораторной работе №2 будет использован метод капилляра.

Описание метода Стокса

В прозрачный стеклянный цилиндр наливается жидкость, вязкость которой нужно определить. При помощи хронометра измеряют время, за которое шарик, изготовленный из материала с плотностью, радиусом $r = d/2$ (d – диаметр шарика) проходит расстояние $L = 0{,}5$ м между двумя отметками A и B (рис. 2).

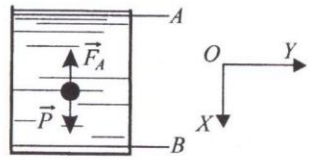

Рис. 2. К описанию метода Стокса

Если шарик опускается в жидкости под действием собственного веса ($P = mg$) с постоянной скоростью, не образуя завихрений жидкости (ламинарное обтекание), то сила сопротивления движению шарика F равна его «кажущемуся» весу (разнице между истинным собственным весом и силой Архимеда F_A, стремящейся вытолкнуть шарик на поверхность жидкости):

$$F = P - F_A. \qquad (3)$$

Здесь эта и последующие формулы записаны в проекции на ось X.

Так как сила Архимеда и истинный вес шарика определяются соответственно формулами:

$$F_A = \rho_ж g V \qquad (4)$$

и

$$P = \rho_{шара} g V, \qquad (5)$$

то, подставляя (4) и (5) в формулу (3), получим:

$$F = \rho_{шара} gV - \rho_ж gV, \qquad (6)$$

где $V = 4\pi r^3/3$ – объем шарика; $\rho_{шара}$ – плотность материала, из которого изготовлен шарик; $\rho_ж$ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения.

В соответствии с законом Стокса сила сопротивления движению шара в вязкой жидкости выражается формулой:

$$F = 6\pi r\eta v, \qquad (7)$$

где, v – скорость движения шарика в жидкости. Тогда при установившемся равномерном движении (а оно наступает к моменту, когда шарик достигнет первой отметки) можно записать соотношение:

$$6\pi r\eta v = \frac{4}{3}\pi r^3 \left(\rho_{шара} - \rho_ж\right) g. \qquad (8)$$

Разрешив уравнение (8) относительно величины η и записав ее в проекции на ось X, получим расчетную формулу для определения вязкости:

$$\eta = \frac{2r^2 g\left(\rho_{шара} - \rho_ж\right)}{9v} \qquad (9)$$

или

$$\eta = \frac{d^2 g\left(\rho_{шара} - \rho_ж\right)\tau}{18L}, \qquad (10)$$

где τ – время.

Экспериментальная часть

В работе используются следующие приборы и принадлежности:

Приборы: микрометр с ценой деления 0,01мм; секундомер С-1-2а с ценой деления 0,1с; термометр с диапазоном измерения 0 – 30°С и ценой деления шкалы 0,1°; линейка миллиметровая 600мм.

Принадлежности: стальные шарики (5 шт.); стеклянный цилиндр с исследуемой жидкостью.

Описание экспериментальной установки

Установка представляет собой стеклянный сосуд с исследуемой жидкостью (глицерином или трансформаторным маслом), снабженный подсветкой и подвижными полукольцами A и B. В сосуд опускаются стальные шарики, время падения которых измеряется с помощью секундомера.

Порядок проведения измерений

1. Микрометром измерить диаметр шарика d_i.
2. Опустить шарик в цилиндр с жидкостью.
3. Секундомером определить время прохождения шариком расстояния AB = 500мм.
4. Измерить температуру жидкости $t_ж$, которую можно принять равной комнатной.
5. По формуле (10) рассчитать коэффициент динамической вязкости, используя табличные значения g, $\rho_{сталь}$= 7700 кг/м^3; $\rho_ж$ = 1260 кг/м^3 – для глицерина и $\rho_ж$= 880 кг/м^3 – для трансформаторного масла.
6. Опыт повторить для пяти шариков и вычислить среднеарифметическое значение $\eta_{сред}$.
7. Провести сравнение опытных значений $\eta_{эксп}$ с табличными значениями $\eta_{табл}$ для глицерина и трансформаторного масла и определить относительную погрешность:

$$\delta = \frac{\left(\eta_{эксп} - \eta_{табл}\right)}{\eta_{табл}} \cdot 100\%. \qquad (11)$$

Результаты измерений и расчетов и их обсуждение

Результаты проведенных измерений и выполненных расчетов записать в следующую таблицу:

Номер опыта	d, мм	τ, с	$t_ж$, °С	$\eta_{эксп}$, Па·с	$\eta_{табл}$, Па·с	δ, %
1						
2						
3						
4						
5						

Лабораторная работа №2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА МЕТОДОМ ПУАЗЕЙЛЯ

Цель работы: Определение коэффициента динамической вязкости воздуха методом капилляра.

Теоретическая часть

Вязкостью (внутренним трением) называется явление возникновения сил, препятствующих относительному перемещению слоев жидкости или газа.

Причиной внутреннего трения в газах является перенос молекулами импульсов между соприкасающимися слоями, движущимися с разными скоростями.

Течение жидкости или газа, при котором соприкасающиеся слои движутся без перемешивания, называется ламинарным.

Движение, сопровождающееся перемешиванием слоев и образованием вихрей, называется турбулентным.

Механизм возникновения силы вязкости

Рассмотрим ламинарное течение газа в горизонтальном канале (или трубе). Мысленно разобьем газ между стенками на тонкие горизонтальные слои (рис.3).

При существовании разности давлений на концах трубки молекулы газа участвуют одновременно и в тепловом хаотическом движении и в направленном течении слоя.

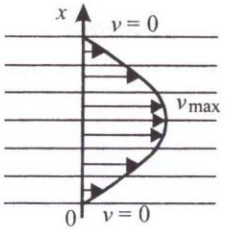

Рис. 3. Профиль скоростей при ламинарном режиме

Скорость течения максимальна в центре канала. У стенок скорость течения стремится к нулю. При ламинарном движении газа по трубе круглого сечения профиль скоростей – параболический.

За счет хаотического движения между соседними слоями идет непрерывный обмен частицами. При этом молекулы из слоев, движущихся с бóльшими скоростями, передают импульс в более медленные слои.

Согласно 2-му закону Ньютона всякое изменение импульса системы с течением времени означает, что на нее действует какая-то сила, которая в данном случае носит название силы внутреннего трения силы вязкости.

Исаак Ньютон установил, что величина силы внутреннего трения между слоями газа (или жидкости) зависит от площади соприкосновения слоев S и от быстроты, с которой меняется скорость течения при переходе от одного слоя к другому в направлении, перпендикулярном оси трубы $\frac{dv}{dx}$. Закон Ньютона для внутреннего трения:

$$F_{\text{вязк}} = \eta \frac{dp}{d\tau} S, \qquad (12)$$

где η – коэффициент динамической вязкости, в системе СИ измеряется в Па·с.

Экспериментальное определение коэффициента вязкости

В случае ламинарного течения газа по трубе круглого сечения можно воспользоваться формулой Пуазейля:

$$Q = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{\Delta p r^4}{\eta l}. \qquad (13)$$

Здесь r – радиус трубы, l – ее длина, Δp – разность давлений на концах трубы, $Q = \frac{V}{\tau}$ – объемный расход газа, т.е. объем газа, протекающего по трубе за время τ.

Для определения вязкости воздуха обычно используются капиллярные трубки. Перепад давлений на концах трубки измеряется водяным манометром:

$$\Delta p = \rho_0 g \Delta h, \qquad (14)$$

где Δh – разность уровней воды в манометре, при стационарном течении газа величина постоянная; ρ_0 – плотность воды; g – ускорение силы тяжести.

Из (13) и (14) следует:

$$\eta = \frac{\pi \rho_0 g r^4}{8l} \cdot \frac{\Delta h \tau}{V}. \qquad (15)$$

Таким образом, для определения коэффициента динамической вязкости методом Пуазейля необходимо измерить объемный расход воздуха в трубке и разность уровней воды в манометре, подключенном к ее концам.

Экспериментальная часть

Приборы и принадлежности: аспиратор, наполненный водой; капиллярная трубка; осушительный фильтр с селикагелем; водяной манометр; емкость; штатив; электронные часы.

Схема лабораторной установки показана на рис.4.

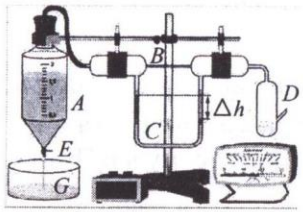

Рис.4. Схема лабораторной установки

Порядок выполнения работы

Перед выполнением работы ознакомиться с указаниями по выполнению лабораторных работ.

Когда из аспиратора A выливается вода, давление в нем понижается и через капиллярную трубку B длиной l = 120мм и радиусом r = 0,8 мм засасывается воздух, проходящий через осушительный фильтр D. Разность давлений на концах трубки B измеряется водяным манометром C.

Для измерения секундного расхода воздуха аспиратор A заполняют водой, открывают кран E и выжидают некоторое время, пока не установится стационарное течение (при этом разность уровней воды в манометре C будет постоянной). Закрыть кран E, повторить опыт три раза.

Все данные заносятся в сводную таблицу.

Номер опыта	V, л	Δh, мм	τ, с	η, Па·с
1				
2				
3				

Примечание. Деление шкалы манометра равно 2мм. Шкала аспиратора градуирована в литрах.

Лабораторная работа №3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА И ЭФФЕКТИВНОГО ДИАМЕТРА МОЛЕКУЛ АЗОТА

Цель работы: Вычисление средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул азота.

Теоретическая часть

Атомы и молекулы в газах находятся в состоянии непрерывного хаотического (теплового) движения. При достаточном сближении друг с другом имеет место заметное отклонение от их прямолинейных траекторий вследствие сил отталкивания между ними. Такое взаимодействие между молекулами называется столкновением. Молекулы реального газа отталкиваются друг от друга при очень малых расстояниях между ними (порядка 3÷5Å, 1Å =10^{-10} м) и притягиваются на больших расстояниях, так что при сближении молекулы взаимодействуют очень сложным образом.

Эффективный диаметр молекулы. Представление о том, что молекулы схематически можно рассматривать как твердые абсолютно упругие и несжимаемые шары, привело к появлению понятия «эффективного диаметра» молекулы, величиной которого удобно характеризовать процесс столкновения молекул. Под ним понимается ***минимальное расстояние, на которое могут сблизиться центры двух молекул при их столкновении.***

В молекулярно-кинетической теории за «эффективный диаметр» молекулы принят диаметр воображаемой сферы, описанной около геометрической конфигурации молекулы, внутрь которой не может проникнуть (попасть) центр никакой другой молекулы.

Величина, равная площади экваториального сечения этой воображаемой сферы $\left(\pi d_{\text{эфф.}}^2\right)$, называется эффективным сечением столкновения для твердой сферической молекулы.

Число столкновений молекул в газе. Предположим, что молекулы представляют собой твёрдые сферы с диаметром d и взаимодействие между ними отсутствует. Примем также, что все молекулы движутся с одинаковой скоростью, равной средней скорости $\overline{v}$.

Две одинаковые молекулы приходят в соприкосновение, когда расстояние между их центрами равно $d_{\text{эфф}}$. Таким образом, движущаяся молекула сталкивается со всеми молекулами (например, с окрашенной в серый цвет на рис.5), центры которых окажутся на расстоянии $d_{\text{эфф}}$ или меньше от ее центра.

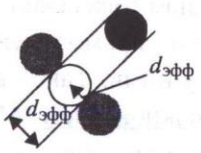

Рис. 5. Столкновение молекул

Молекула, передвигаясь со скоростью v, столкнется с $v \cdot \pi d^2 n$ молекулами (где n – число молекул в единице объема).

Точный расчет числа столкновений, испытываемых молекулами в единицу времени, производится методами статистической физики и весьма сложен. Поэтому ограничимся следующим приближением. Будем считать все молекулы неподвижными, за исключением

одной молекулы, движущейся относительно остальных со средней скоростью в $\sqrt{2}$ раза бóльшей:

$$v_{\text{отн}} = v \cdot \sqrt{2} \qquad (16)$$

и, следовательно, число столкновений одной молекулы в единицу времени со всеми молекулами, центры которых лежат внутри цилиндра (рис.5), будет:

$$z = \sqrt{2}\pi d^2 \cdot nv. \qquad (17)$$

Средняя длина свободного пробега

Траектория движения любой частицы жидкости или газа представляет ломаную линию (рис.6), так как при столкновениях частица меняет своё направление и скорость движения.

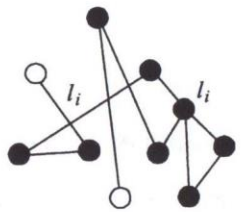

Рис. 6. Хаотическое перемещение молекулы в газе

Величина l_i представляет путь, который молекула свободно пролетает от одного столкновения до следующего. Это расстояние, которое центр масс молекулы проходит между двумя последовательными соударениями, называется <u>длиной свободного пробега</u> молекулы. Вследствие хаотичности молекулярного движения значения величин l_i постоянно меняются. Поэтому вводится понятие <u>средней длины свободного пробега</u>, которая определяется следующим образом.

За единицу времени молекула проходит расстояние в среднем $v\tau$ (где τ =1с) и испытывает z соударений. Отсюда, средняя длина свободного пробега молекул составит:

$$\langle l \rangle = \overline{v} / z = \left(\sqrt{2}\pi d^2 n\right)^{-1}, \qquad (18)$$

т.е. средняя длина свободного пробега молекул идеального газа определяется только их диаметром и концентрацией.

Заменяя в соответствии с основным уравнением кинетической теории число молекул $n = \dfrac{p}{kT}$, получим:

$$\langle l \rangle = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p}. \qquad (19)$$

Количественная оценка средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул

В молекулярно-кинетической теории идеальных газов доказывается, что

$$\eta = \frac{1}{3}\rho\langle l \rangle \cdot \langle u \rangle, \qquad (20)$$

где ρ – плотность газа; u – средняя арифметическая скорость молекул, определяемая по формуле:

$$\langle u \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}, \qquad (21)$$

Выразим плотность газа $\rho = \frac{m}{V}$ из уравнения Клапейрона-Менделеева:

$$\rho = \frac{p\mu}{RT}. \qquad (22)$$

Подставив (21) и (22) в (20), получим формулу для вычисления $\langle l \rangle$:

$$\langle l \rangle = \frac{3\eta}{p}\sqrt{\frac{\pi RT}{8\mu}}, \qquad (23)$$

где p – давление, T – температура воздуха, измеряемые при помощи барометра и термометра, μ – молярная масса воздуха, равная 29 кг/кмоль; R – универсальная газовая постоянная, η –коэффициент динамической вязкости, найденный экспериментально методом Пуазейля.

Зная $\langle l \rangle$, эффективный диаметр молекулы можно определить из (19):

$$d = \sqrt{\frac{kT}{\sqrt{2}\pi p \langle l \rangle}}, \qquad (24)$$

где $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

Экспериментальная часть

Приборы и принадлежности: цилиндрический сосуд с капилляром на ¾ заполненный водой; термометр с пределом измерения температуры 50°С и ценой деления 0,2°С; секундомер С-1-2а с ценой деления 0,1 с; весы лабораторные; барометр бытовой БК-СН (пределы измерения 720÷800 мм.рт.ст); стеклянный стаканчик с делениями.

Порядок проведения опыта

1. Заполняем сосуд *A* водой на три четверти объема (рис. 7).
2. Открываем кран *B* и, дождавшись, когда вода начнет вытекать из баллона каплями, подставляем предварительно взвешенный стаканчик и одновременно включаем секундомер. При этом в сосуд *A* будет поступать воздух по капилляру *C*.
3. В момент начала появления капель по шкале, укрепленной на сосуде, записываем начальный уровень воды h_1.
4. Когда в стаканчике будет приблизительно 50–70 см^3 воды, закрываем кран *B* и одновременно выключаем секундомер. Записать время истечения воды.
5. Отмечаем новый уровень воды h_2.
6. Взвешиваем стаканчик с водой и по массе вытекшей воды определяем ее объем, который будет равен объему воздуха, вошедшего в сосуд через капилляр.
7. Рассчитаем разность давлений на концах капилляра по формуле:

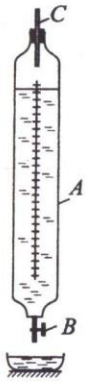

Рис. 7

$$\Delta p = \rho_1 g\left(h_1 + h_2\right)/2, \qquad (25)$$

где ρ_1 – плотность воды.

8. Измеряем температуру комнатным термометром, а атмосферное давление по барометру.
9. Значения радиуса и длины капилляра прилагаются к работе (узнать у лаборанта или преподавателя).

10. Вычислить длину свободного пробега молекулы азота по формуле (23), предварительно рассчитав η по формуле (15).

11. Опыт повторить три раза и затем найти среднеарифметическое значение средней длины свободного пробега молекулы азота.

12. По среднеарифметическому значению средней длины свободного пробега найдем эффективный диаметр молекулы азота по формуле:

$$d = \sqrt{\frac{Tp_0}{\sqrt{2}\pi n_0 p T_0 \langle l \rangle_{\text{средн}}}}, \qquad (26)$$

где n_0 – число Лошмидта (число молекул в единице объема газа при нормальных условиях $P_0 = 1{,}013 \cdot 10^5$ Па, $T_0 = 273$ К)

Результаты измерений и расчетов

Результаты проведенных измерений и выполненных расчетов записать в следующую таблицу:

Номер опыта	τ, с	h_1, м	h_2, м	Δp, Па	V, м^3	p, Па	T, К	$\langle l \rangle$, мм	d, м
1 2 3									
Среднее									

Лабораторная работа №4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ МЕТОДОМ КЛЕМАНА-ДЕЗОРМА

Цель работы: Определение показателя адиабаты (коэффициента Пуассона) для воздуха методом адиабатического изменения состояния газа.

Теоретическая часть

Термодинамический процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой, называется адиабатическим, а уравнение состояния идеального газа в этом процессе – уравнением Пуассона:

$$pV^{\gamma} = \text{const}. \qquad (27)$$

Здесь p – давление, V – объем, γ – показатель адиабаты (или коэффициент Пуассона).

В газовой динамике (аэродинамике) показатель адиабаты имеет самое широкое применение. Этот коэффициент представляет собой отношение:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V}, \qquad (28)$$

где C_p – молярная теплоемкость при постоянном давлении, C_V – молярная теплоемкость при постоянном объеме, R – универсальная газовая постоянная, равная 8,314 Дж/(моль·К).

Коэффициент Пуассона очень часто применяется при аэродинамических (газодинамических) расчетах, так как входит в энергии сжимаемого газа (уравнение Бернулли).

Опытным путем установлено, что γ зависит от числа атомов, образующих молекулу газа (см. табл. 3 Приложения).

Молярная теплоемкость при постоянном давлении C_p представляет собой количество тепла, которое следует подвести к одному молю (газа), чтобы нагреть его на 1К, когда давление неизменно, а объем изменяется:

$$C_p = \left(\frac{dQ}{dT}\right)_p. \qquad (29)$$

Молярная теплоемкость при постоянном объеме C_V представляет количество тепла, которое необходимо подвести к одному молю (газа), заключенному в неизменном объеме, чтобы нагреть его на 1К:

$$C_V = \left(\frac{dQ}{dT}\right)_V. \qquad (30)$$

Из 1-го закона термодинамики следует:

$$\delta Q = dU + \delta A. \qquad (31)$$

где δQ – количество тепла, сообщенное газу, dU – изменение внутренней энергии газа, δA – работа газа.

Количество теплоты и работа не являются функциями состояния системы, а являются функциями процесса, т.е. зависят от формы пути, по которому система переходит из одного состояния в другое и потому не являются полными дифференциалами.

Изменение внутренней энергии для моля газа

$$dU = \frac{i}{2} RdT, \qquad (32)$$

где i – число степеней свободы молекул газа; R – универсальная газовая постоянная; T – температура.

Работа моля газа при p = const равна

$$\delta A = pdV; \qquad (33)$$

или

$$\delta A = RdT. \qquad (34)$$

Поэтому (31) можно представить в виде

$$\delta Q = \frac{i}{2} Rdt + pdV. \qquad (35)$$

Вычислим C_v. Для этого в (30) подставим (35), в котором $pdV = 0$, так как $dV = 0$. Получим:

$$C_v = \frac{i}{2} R. \qquad (36)$$

Вычислим C_p с учетом (34). Следовательно

$$C_p = \frac{i}{2} R + R. \qquad (37)$$

Сопоставляя выражения (36) с (37) получим уравнение Майера

$$C_p = C_v + R. \qquad (38)$$

Определение коэффициента Пуассона

Этот метод основан на использовании диаграммы $p - V$, представленной на рис. 8. Здесь процесс 1 – 2 является адиабатическим. Поэтому

$$p_1 V_1^{\gamma} = p_2 V_2^{\gamma}. \qquad (39)$$

Если затем осуществить изохорный процесс 2 – 3 до первоначальной (комнатной) температуры T_1, то

$$p_1 V_1 = p_3 V_3. \qquad (40)$$

Решая систему двух уравнении (39) и (40), получим

$$\gamma = \frac{\ln(p_1 / p_2)}{\ln(p_1 / p_3)} \qquad (41)$$

Рис. 8. Изменение состояния газа в $p - V$ диаграмме

Тогда определение коэффициента Пуассона γ сводится к проведению измерений давления в начале (p_1) и конце (p_2) адиабатного изменения состояния газа, а также измерения давления газа в конце изохорного процесса p_3, доводимого до начальной (комнатной) температуры T_1. При этом необходимо иметь ввиду, что $p_1 = p_2 + \Delta p_1$, $p_3 = p_2 + \Delta p_2$, а значения Δp_1 и Δp_2 определяются при помощи жидкостного манометра по разнице уровней Δh_1 и Δh_2.

Расчет по формуле (41) можно упростить. Так как давления p_1, p_2 и p_3 мало отличаются друг от друга, логарифм давлений в первом приближении можно заменить их численными значениями:

$$\gamma = \frac{\ln p_1 - \ln p_2}{\ln p_1 - \ln p_3} = \frac{p_1 - p_2}{p_1 - p_3} = \frac{p_2 + \Delta p_1 - p_2}{p_2 + \Delta p_1 - p_2 - \Delta p_2} = \frac{\Delta p_1}{\Delta p_1 - \Delta p_2} \qquad (42)$$

Отношение избыточных давлений (Δp) заменяется отношением разностей уровней жидкости (Δh) в U-образном манометре:

$$\gamma = \frac{\Delta h_1}{\Delta h_1 - \Delta h_2}. \qquad (43)$$

Экспериментальная часть

Приборы и принадлежности: Закрытый стеклянный сосуд с двумя кранами, жидкостный манометр (водяной), насос ручной, соединительные резиновые (или хлорвиниловые) трубки.

Описание установки

Общая схема установки, использующей методику, указанную в теоретической части, представлена на рис. 9.

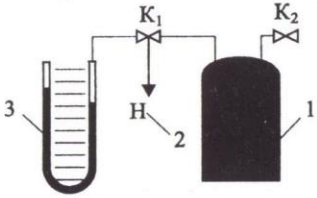

Рис. 9. Схема установки

Принцип ее действия состоит в следующем. В стеклянном сосуде (1) находится исследуемый газ под давлением p_1, несколько большем атмосферного давления p_2. Избыточное давление в сосуде (1) измеряется жидкостным U-образным манометром (манометром Торричелли) (3).

Предварительное заполнение сосуда (1) исследуемым газом производится с помощью насоса (2) через стеклянную трубку с краном $К_1$. После заполнения сосуда (1) газом кран $К_1$ закрывается.

После того, как газ в сосуде (1) примет температуру окружающей среды $T_{комн}$, что будет соответствовать установившемуся показанию давления по манометру (3), производят быстрое открытие крана $К_2$, вследствие чего исследуемый газ расширяется до атмосферного давления (кривая 1-2 на рис. 8).

При быстром стравливании газа из сосуда (1) приближенно можно считать, что это расширение происходит без теплообмена с окружающей средой (т.е. адиабатически). В момент конца адиабатного расширения газа в сосуде 1 закрывают кран $К_2$. Газ в конце адиабатного расширения имеет температуру более низкую, чем начальная $T_2<T_1$, а значит, и более низкую, чем $T_{комн}$.

После закрытия крана $К_2$ будет происходить изохорный процесс нагревания газа посредством его теплообмена через стенки сосуда (1) с окружающей средой. В результате этого давление газа p_3, измеряемое манометром (3) будет расти до тех пор, пока температура газа не будет равна $T_{комн}$.

В итоге такого эксперимента по известным значениям Δh_1 и Δh_2. можно определить γ по уравнению (43).

Указания к проведению измерений и расчетов

1. Закрыть кран $К_2$, а кран $К_1$ открыть.
2. Осторожно нагнетая воздух ручным насосом (или от баллона со сжатым воздухом или иным газом), наполнить сосуд воздухом (газом) так, чтобы разность уровней в манометре (3) не достигнет 20 – 25 см, после чего кран $К_1$ закрыть.
3. Когда давление окончательно установится, произвести отсчет разности уровней воды в обоих коленах манометра (Δh_1).
4. Быстро поворачивая кран $К_2$, открыть на короткое время сосуд (1) и тотчас же закрыть кран $К_2$.
5. Когда давление окончательно установится, записать разность уровней воды в обоих коленах манометра (Δh_2).
6. Опыт повторить не менее 5 раз.
7. Вычислить коэффициент Пуассона по уравнению (43).
8. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу.
9. Окончательный результат сравнить с табличным значением (см. приложение 1).

Результаты измерений и расчетов

Результаты проведенных измерений и расчетов представим в виде следующей таблицы:

Номер опыта	Δh_1, мм.	Δh_2, мм.	γ
1			
2			
3			
4			
5			

Обсуждение методики и результатов опытов

Результаты экспериментов на установке, реализующей метод Клемана-Дезорма, не обладают достаточной точностью и дают, как правило, заниженные значения коэффициента Пуассона. Это объясняется следующими причинами:

1. Отклонением реального процесса расширения газа от адиабатного.

2. Значительными колебаниями давления газа в сосуде, вызванными открытием крана K_2, вследствие чего нельзя точно определить момент, когда давление расширяющегося газа станет равным атмосферному p_2.

Лабораторная работа № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭНТРОПИИ ПРИ ПЛАВЛЕНИИ ОЛОВА

Цель работы: 1. Ознакомление с понятием энтропии, вторым законом термодинамики, методами расчета изменения энтропии при нагревании системы и изменения энтропии, сопровождающего фазовый переход.

2. Экспериментальное измерение приращения энтропии при переходе олова из твердого состояния в жидкое.

Теоретическая часть

В настоящей работе рассматривается изменение энтропии при переходе олова из твердого состояния в жидкое (плавление олова).

Аналитическая формулировка второго закона термодинамики:

$$dS \geq \frac{dQ}{T}, \tag{44}$$

где dS – бесконечно малое изменение энтропии системы,

dQ – бесконечно малое количество тепла, сообщенного системе,

T – абсолютная температура системы.

Для обратимых процессов[1)] формула (44) имеет вид:

$$dS = \frac{dQ}{T}. \tag{45}$$

[1] Обратимые процессы – такие процессы, которые можно провести в обратном направлении через то же самое состояние.

Конечное изменение энтропии системы при переходе ее из одного состояния 1 в другое 2 находим, интегрируя соотношение (45):

$$\int_1^2 dS = \int_1^2 \frac{dQ}{T};$$
$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T}. \tag{46}$$

Прежде, чем олово расплавится, его необходимо нагреть от начальной температуры $T_н$ до температуры $T_{пл}$. Количество теплоты, которое нужно затратить на нагрев, можно найти из уравнения теплового баланса

$$dQ = cmdT, \tag{47}$$

где c – удельная теплоемкость олова, считается величиной постоянной, m – масса олова, dT – изменение температуры олова при сообщении ему количества теплоты dQ.

Изменение энтропии олова при нагревании его от $T_н$ до $T_{пл}$ составит

$$\Delta S_{нагр} = \int_1^2 \frac{cmdT}{T} = \int_{T_{нагр}}^{T_{пл}} \frac{cmdT}{T} = cm\ln\left(\frac{T_{пл}}{T_н}\right). \tag{48}$$

Собственно процесс плавления (фазовый переход олова из твердого состояния в жидкое) происходит при постоянной температуре (температуре плавления $T_{пл}$), то есть является изотермическим.

Изменение энтропии в изотермическом процессе имеет вид

$$\Delta S = \frac{1}{T}\int_1^2 dQ. \tag{49}$$

Количество теплоты $Q_{пл}$, затраченное на плавление олова при температуре плавления, равно:

$$Q_{пл} = \lambda m, \tag{50}$$

где λ – удельная теплота плавления.

Следовательно, изменение энтропии, сопровождающее любой фазовый переход (в нашем случае – плавление) составит:

$$\Delta S_{пл} = \frac{1}{T}\int_1^2 dQ_{пл} = \frac{1}{T}\int_1^2 d(\lambda m) = \frac{\lambda m}{T}; \qquad (51)$$

$$T = T_{пл}.$$

Общее изменение энтропии при переходе олова из твердого состояния в жидкое будет:

$$\Delta S = \Delta S_{нагр} + \Delta S_{пл} = cm\ln\left(\frac{T_{пл}}{T_н}\right) + \frac{\lambda m}{T_{пл}}. \qquad (52)$$

Таким образом, для определения приращения энтропии при расплавлении олова достаточно измерить массу олова, начальную температуру и температуру плавления олова.

Экспериментальная часть

Приборы, оборудование, принадлежности и материалы.

В работе используются приборы:

1) термометр ртутный с пределом измерения температуры 250°С и ценой деления 0,5°С;

2) секундомер типа С-1-2а;

3) весы лабораторные.

Оборудование: термостат (печь).

Принадлежности: тигель фарфоровый.

Материалы: олово (Sn).

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка состоит из термостата (печи), в котором (ой) помещен фарфоровый тигель с оловом.

Через верхнее отверстие в термостате в чашку с оловом вставлен ртутный термометр для контроля температуры олова.

Порядок проведения опыта

1. Тигель с оловом взвешивают на весах и помещают в термостат. Определяют массу олова: $m = m_1 - m_{тигля}$

2. Измеряют начальную температуру:

$$T_н = t_0 + 273{,}15,$$

где t_0 – показание ртутного термометра в °С

3. Включают термостат (печь) в сеть 220В и через равные промежутки времени, контролируемые секундомером, измеряют температуру олова. По результатам измерения строят «кривую нагревания» (рис. 10) – график, выражающий зависимость температуры системы от времени $T_{ол} = f(\tau)$.

«Кривая нагревания» обладает четко выраженными горизонтальными участками, соответствующими температуре фазового перехода. Величина горизонтального участка зависит от теплового эффекта фазового перехода, количества взятого вещества и скорости подвода тепла.

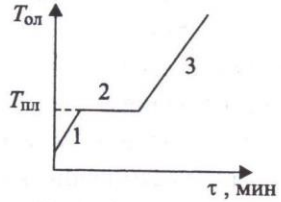

Рис. 10. Температурная диаграмма плавления олова

4. Доводят олово до жидкого состояния. Плавление олова наблюдают непосредственно через окошечко термостата, а также по появлению на графике $T_{ол} = f(\tau)$ горизонтального участка 2, соответствующего температуре плавления олова $T_{пл}$.

5. Определяют температуру плавления олова T.

6. По формуле (52) вычисляют приращение энтропии при расплавлении олова. Величины c и λ берутся из табл. 4 Приложения.

7. Каждое измерение проводят 5 раз и производят оценку случайной ошибки измерения по правилам анализа случайных ошибок косвенного измерения.

Лабораторная работа № 6

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ

Цель работы: измерение коэффициента поверхностного натяжения жидкости (дистиллированной воды) методом отрыва кольца.

Теоретическая часть

Коэффициент поверхностного натяжения является важной характеристикой жидкости, поскольку эта величина непосредственно связана с межмолекулярными силами. Знание коэффициента поверхностного натяжения необходимо для расчета всевозможных капиллярных явлений, для применения таких важнейших технологических процессов, как флотация руд и минералов. С коэффициентом поверхностного натяжения связаны другие существенные характеристики жидкостей: теплота испарения, адсорбции и др. Поэтому измерение этой величины имеет важное научное и техническое значение.

В отличие от газа, молекулы которого почти не взаимодействуют, жидкости отличаются весьма сильным взаимодействием молекул между собой. Потенциальная энергия взаимодействия превосходит кинетическую энергию теплового движения молекул. Следствием этого является то, что жидкость сохраняет свой объем, обладает очень малой сжимаемостью и имеет характерную особенность – свободную поверхность, граничащую с газом (точнее с паром самой жидкости).

Молекулы на поверхности жидкости находятся в условиях, отличных от тех, в которых находятся молекулы внутри жидкости. Внутри жидкости каждая молекула окружена со всех сторон такими же молекулами. Поэтому силы притяжения, действующие на молекулу со стороны всех ее соседей, оказываются скомпенсированными.

Напротив, всякая молекула на поверхности окружена молекулами жидкости не со всех сторон. Поэтому сумма сил притяжения со стороны «соседей», не равна нулю: их равнодействующая направлена внутрь жидкости. На молекулы поверхностного слоя действует сила, стремящаяся перевести их вглубь жидкости. Благодаря этому молекулы поверхностного слоя обладают большой потенциальной энергией по сравнению с «глубинными» молекулами.

Поэтому при отсутствии каких - либо сил, действующих на молекулы, кроме сил взаимодействия между ними, жидкость принимает такую форму, при которой площадь ее поверхности является минимальной при данном объеме, т.е. форму сферы. При этом максимальное число молекул находится не на поверхности, а внутри объема жидкости. В реальных условиях, однако, на жидкость действуют, кроме внутренних межмолекулярных сил, во-первых, сила тяжести и, во-вторых, сила взаимодействия между молекулами жидкости и частицами твердого тела, с которыми жидкость контактирует, например, стенками сосуда.

Действительная форма жидкости и определяется противодействием этих трех сил. Плоская поверхность жидкости объясняется тем, что силы тяжести превосходят все другие силы, действующие на жидкость. Искривление поверхности у краев сосуда, содержащего жидкость (мениск) объясняется влиянием сил взаимодействия с твердым телом. Во всех случаях площадь поверхности минимальна при данных условиях.

Основы метода измерения поверхностного натяжения жидкости

Молекулы поверхностного слоя обладают, как указывалось, повышенной потенциальной энергией. Поэтому всякое изменение площади поверхности жидкости связано с совершением работы. Если поверхность жидкости уменьшается, то работу совершает жидкость. Если, наоборот, площадь поверхности возрастает, значит, совершена работа внешних сил над жидкостью. Очевидно, что произведенная работа численно равна изменению поверхностной энергии, которое, в свою очередь, пропорционально изменению площади поверхности жидкости. Если изменение поверхностной энергии обозначить через dE, а изменение площади поверхности через dS, то можно записать:

$$dE = \sigma dS, \quad T = \text{const}. \tag{53}$$

Коэффициент пропорциональности σ, входящий в эту формулу, называется коэффициентом поверхностного натяжения жидкости. Тогда σ будет равен:

$$\sigma = \left(\frac{dE}{dS}\right)_T, \quad T = \text{const}, \tag{54}$$

т.е. коэффициент поверхностного натяжения равен изменению поверхностной энергии при изменении площади поверхности жидкости на единицу. Иначе говоря, коэффициент поверхностного натяжения равен работе, которую нужно совершить для увеличения площади поверхности жидкости на единицу, или работе, которую совершает поверхностный слой при ее уменьшении на единицу.

Благодаря тому, что силы, действующие на поверхностный слой жидкости, стремятся уменьшить площадь ее поверхности, жидкости ведут себя так, как будто бы их поверхности представляют собой тонкие упругие «натянутые» пленки. Многие опыты, например, с мыльными пузырями, жидкими пленками, «натянутыми» на проволочные каркасы, такие явления, как образование пены и др., свидетельствуют об этом.

Разумеется, никакой особой упругой пленки на поверхности жидкости в действительности не существует. Реально существуют поверхностные молекулы, на которые действуют силы, направленные внутрь жидкости. Но именно поэтому можно считать, что на поверхности жидкости действуют силы, касательные к ней и перпендикулярные к любой линии, взятой на поверхности, и к любой линии, составляющей границу между поверхностью жидкости и твердым телом (линии раздела). Поэтому для любой линии, проведенной на поверхности жидкости или являющейся границей между нею и твердым телом, можно написать равенство:

$$F = \sigma l, \tag{55}$$

где F – сила, действующая на линию, l – ее длина.

С этой точки зрения коэффициент поверхностного натяжения представляет собой силу, действующую на единицу длины произвольной линии на поверхности жидкости.

Из равенств (53) и (55) видно, что размерность коэффициента поверхностного натяжения или Дж/м^2, или Н/м.

Легко убедиться в том, что равенство (55) непосредственно следует из (53). Если, например, некоторая поверхность жидкости dS увеличилась из-за того, что под действием силы F ее граница сместилась на расстояние dh, то потенциальная энергия поверхностного слоя увеличилась на dE, т.е.

$$dE = \sigma dS = \sigma l dh. \tag{56}$$

С другой стороны, сила F, сместившая границу на расстояние dh, совершила при этом работу:

$$dA = F dh. \tag{57}$$

Но $dE = dA$. Отсюда

$$\sigma = \frac{F}{l} \tag{58}$$

Экспериментальная часть

В настоящей работе используется метод, основанный на измерении силы, необходимой для отрыва кольца от поверхности жидкости, с которой оно приведено в соприкосновение. Измерение силы производится с помощью динамометра (метод Жюли).

Если кольцо, смачиваемое исследуемой жидкостью, отрывать от контактирующей с ним жидкости, то можно считать, что отрыв происходит по двум линиям – внешней и внутренней окружности кольца. Если внешний диаметр кольца равен d_1, а внутренний d_2, то сила, удерживающая жидкость у кольца, согласно (58), равна:

$$F = \pi d_1 \sigma + \pi d_2 \sigma = \pi(d_1 + d_2)\sigma. \tag{59}$$

Отсюда, зная d_1 и d_2 и измерив F, получаем для коэффициента поверхностного натяжения выражение:

$$\sigma = \frac{F}{\pi(d_1 + d_2)} \qquad (60)$$

Это и есть основная формула для расчета поверхностного натяжения, используемая в данной работе.

Описание экспериментальной установки

Принципиальная схема экспериментальной установки для измерения коэффициента поверхностного натяжения жидкости изображена на рис. 11. На массивном штативе *1* закреплен держатель *2* с пружиной *3*, тарелочкой *4* и кольцом *5*. Держатель с помощью винта может перемещаться как вдоль штатива, так и вокруг него. В нижней части штатива укреплен микрометрический винт *7* с сосудом *6* для жидкости.

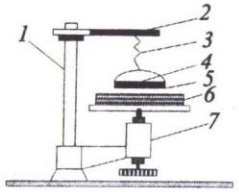

Рис. 11. Принципиальная схема установки

Отрыв кольца от жидкости, с которой оно соприкасается, производится опусканием сосуда с помощью микрометрического винта. При этом по растяжению пружины измеряемому микрометрическим винтом, определяется сила F в момент отрыва кольца.

Сила F, возникающая при растяжении пружины, определяется законом Гука (естественно, если растяжение небольшое, т.е. в пределах упругости пружины):

$$F = -kx, \qquad (61)$$

где x – удлинение пружины, а k – жесткость пружины, равная силе, возникающей при удлинении, равном единице. Чтобы пользоваться пружиной как динамометром, нужно прежде всего определить коэффициент k, т.е. проградуировать пружину.

Для этого убирают сосуд с жидкостью с подставки и устанавливают положение микрометрического винта вблизи нулевого. Затем, вращая винт на штативе и перемещая при этом тарелочку

с кольцом, приводят кольцо в контакт с подставкой. Записывают показания микрометрического винта и обозначают это показание l_0. Оно соответствует положению микрометрического винта при отсутствии нагрузки на пружину.

Затем помещают на тарелочку последовательно гирьки массой 0,5; 1; 1,5 г и т.д. каждый раз при этом, отмечая положения на микрометрическом винте (естественно нагружают пружину в пределах показаний микрометрического винта). Если обозначить значения микрометрического винта, соответствующие нагрузке на пружину m_i, через l_i (где i = 1,2,3, …, n; n – число измерений), то удлинение пружины x_i будет равно $l_i - l_0$. Тогда коэффициент жесткости пружины будет определяться выражением:

$$k_i = \frac{m_i g}{l_i - l_0}, \qquad (62)$$

где g – ускорение свободного падения; m_i – масса i -ой гирьки.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с описанием работы и лабораторной установкой.

2. Вышеописанным способом определить жесткость пружины. Измерения проделать 7 - 10 раз, занести их в таблицу:

Результаты измерений

Номер по порядку	m_i, г	l_i, мм	l_0, мм	$l_i - l_0$, мм	k_i, Н/м	$k_{ср}$, Н/м
1						
2						
3						
…						
7						

Рассчитать среднее значение $k_{ср}$

$$k_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^{n} k_i}{n} \qquad (63)$$

и его среднеквадратичную ошибку $S_{\bar{k}}$:

$$S_{\bar{k}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(k_i - \bar{k}\right)^2}{n(n-1)}}. \qquad (64)$$

3. С помощью штангенциркуля определить внутренний d_2 и внешний d_1 диаметр кольца в 5 – 6 местах.

4. Рассчитать среднее значение $\bar{d}_1$ и $\bar{d}_2$ и их среднеквадратичную ошибку. Сравнить с систематической ошибкой измерения диаметров.

5. Протереть кольцо спиртом или ацетоном и подвесить его на пружину.

6. Налить в сосуд исследуемую жидкость (чаще всего дистиллированную воду).

7. Перемещая держатель, подвести кольцо к поверхности жидкости на расстоянии 5÷6 мм от нее. Поворотом кольца на подвесе добиться параллельности среза кольца с поверхностью исследуемой жидкости.

8. Микрометрическим винтом поднять столик до соприкосновения кольца с поверхностью жидкости. Убедиться в полном касании кольца и записать показания на шкале микрометрического винта. Это нулевое положение на шкале микрометра L_0 (лучше, чтобы оно было ближе к нулю микрометра).

9. Медленно опускать столик с жидкостью при помощи микрометрического винта. Зафиксировать момент отрыва кольца от жидкости визуально и на микрометре L_0.

10. Повторить опыт 5 – 7 раз.

11. Из полученных значений вычислить удлинение пружины в момент отрыва кольца

$L_i - L_0$, среднее значение удлинения $\bar{L}$ и его среднеквадратичную ошибку $S_{\bar{L}}$:

$$\bar{L} = \frac{1}{n}\cdot\sum_{i=1}^{n}\left(L_i - L_0\right), \qquad (65)$$

$$S_{\bar{L}} = \sqrt{\frac{\sum_{I=1}^{n}(L_i - L_0 - \bar{L})^2}{n(n-1)}}. \qquad (66)$$

Сравнить с систематической ошибкой измерения удлинения ΔL микрометром.

12. Определить средний коэффициент поверхностного натяжения исследуемой жидкости:

$$\bar{\sigma} = \frac{\overline{kL}}{\pi(\bar{d}_1 + \bar{d}_2)} \qquad (67)$$

и погрешность его измерения:

$$\Delta\sigma = \bar{\sigma}\sqrt{\left(\frac{\Delta k}{\bar{k}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{\bar{L}}\right)^2 + \frac{\Delta d_1^2 + \Delta d_2^2}{\left(\bar{d}_1 + \bar{d}_2\right)^2}}. \qquad (68)$$

13. Сделать выводы.

Приложение

Таблица 1

Физические свойства некоторых жидкостей при t =20°C и давлении P = 1013,25 гПа.

Жидкость	ρ, г/см^3	η, сПз	ν, м^2/с
Бензин Б –70	0,751	0,529	0,700
Вода	0,997	1,005	1,008
Глицерин	1,258	1480,0	1176,5
Трансформаторное масло	0,879	21,10	24,0

Таблица 2

Температурная зависимость коэффициента динамической вязкости глицерина

Температура, °C	η, мПа·с
10	3950
20	1480
30	600
40	330
50	180

Таблица 3

Изобарная теплоемкость и коэффициент Пуассона некоторых газов при *p* =1атм и T =298,15K

Газы	C_p, $\frac{Дж}{(моль \cdot K)}$	N,	$\gamma = 1 + \frac{R}{C_p - R}$	Примечание
Азот	29,12	2	1,4	
Аммиак	36,755	4	1,292	T=300K, p=1бар
Аргон	20,79	1	1,67	
Бутан	97,525	14	1,093	
Водород	29,83	2	1,386	
Водяной пар	75,26	3	1,124	T=323K, p=1бар
Воздух	29,20	2	1,4	
Кислород	29,36	2	1,398	
Криптон	20,79	1	1,67	
Ксенон	21,0	1	1,67	T=300K, p=1бар
Метан	35,934	4	1,30	T=300K, p=1бар

Окончание табл. 3

Газы	C_p, $\frac{Дж}{(моль \cdot K)}$	n,	$\gamma = 1 + \frac{R}{C_p - R}$	Примечание
Неон	20,79	1	1,67	
Оксид углерода	29,16	2	1,4	T=300K, p=1бар
Пропан	74,08	11	1,126	T=300K, p=1бар
Углекислый газ	37,45	3	1,287	T=300K, p=1бар
Этилен	43,45	6	1,244	

Таблица 4

Теплофизические свойства некоторых твердых веществ

Элемент	Символ	$t_{пл}$, °C	C, кДж/(кг·К)	λ, кДж/кг
Олово	Sn	231,1	0,230	59,88
Свинец	Pb	327,4	0,130	24,71
Цинк	Zn	419,5	–	117,67
Сера	S	112,8	0,695	55,28

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Савельев И.В.* Курс физики. Т.1 Механика. Молекулярная физика. М.: Наука, 1989. -352с.
2. *Трофимова Т.И.* Курс физики. М.: Высш. школа,1994.-542 с.
3. *Фейман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Феймановские лекции по физике. М.: Мир, 1977. Т. 3-4. 496 с.
4. *Кухлинг Х.* Справочник по физике / Пер. с нем. 2-е изд. М.: Мир, 1982. -520с.
5. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред.акад. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.