

РАЗДЕЛ 2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ К РАБОТЕ 2.1

Реальная жидкость, в отличие от идеальной, обладает вязкостью (внутренним трением), обусловленной взаимодействием между ее молекулами.

При течении жидкости сила внутреннего трения подчиняется закону Ньютона:

$$F = -\eta \frac{\Delta V}{\Delta x} S, \quad (2.1)$$

где $\frac{\Delta V}{\Delta x}$ – градиент скорости [1/с]; координата x направлена перпендикулярно поверхности S ; S – площадь соприкосновения слоёв жидкости [м^2]; η (этта) – динамический коэффициент вязкости [$\text{кг/м}\cdot\text{с}$].

Если в формуле (2.1) $S = 1\text{м}^2$; $\frac{\Delta V}{\Delta x} = -1\text{с}^{-1}$, то $F = \eta$.

Динамический коэффициент вязкости (η) численно равен силе внутреннего трения, действующей на единицу площади соприкосновения параллельно движущихся слоев жидкости при единичном градиенте скорости.

Для шарика, движущегося в вязкой жидкости, сила сопротивления определяется по закону Стокса:

$$F = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot V, \quad (2.2)$$

где r – радиус шарика, м; V – скорость движения шарика, м/с.

На шарик, погруженный в жидкость, действуют следующие силы:

– сила тяжести $P_1 = mg = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_1 g$,

где $\frac{4}{3} \pi r^3$ – объем шарика; ρ_1 – плотность материала шарика, кг/м^3 ;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

– выталкивающая сила P_2 , которая по закону Архимеда равна:

$$P_2 = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_2 g,$$

где ρ_2 – плотность жидкости, кг/м^3 ;

– сила сопротивления F .

Если в стеклянный цилиндр (1) (рисунок 2.1), наполненный исследуемой жидкостью, опустить шарик (2), то первоначально он будет двигаться вниз с ускорением, поскольку равнодействующая трех сил (силы тяжести, выталкивающей силы и силы сопротивления), приложенных к падающему в жидкости шарик, отлична от нуля. По мере возрастания скорости шарика υ увеличивается сила сопротивления F , и в конечном итоге равнодействующая обращается в нуль. Поэтому, начиная с определенного момента времени, движение шарика становится равномерным (для таких жидкостей, как глицерин, касторовое масло это происходит на глубине 5–6 см).

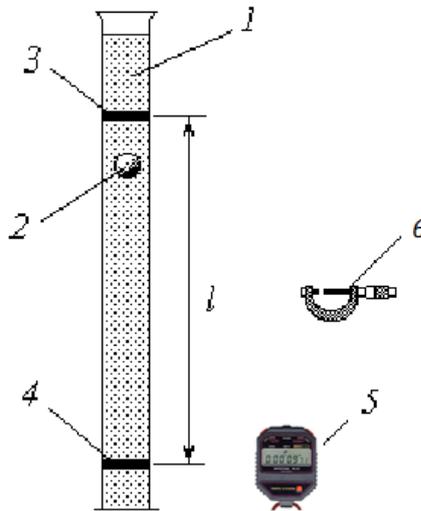


Рисунок 2.1 – Схема установки

Так как для установившегося движения будет иметь место соотношение – $\vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \vec{F} = 0$, то:

$$\frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot g \cdot (\rho_1 - \rho_2) = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot V$$

Если шарик прошел в жидкости расстояние L за время t , то для равномерного движения $V = \frac{L}{t}$, следовательно, коэффициент вязкости равен:

$$\eta = \frac{2 \cdot r^2 \cdot g \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot t}{9 \cdot L} \quad (2.3)$$

Расстояние L выделено между двумя горизонтальными метками (3) и (4), нанесенными на цилиндре (см. проволочные кольца, верхнее из которых должно быть ниже уровня жидкости на 5–6 см).

РАБОТА 2.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ ПАДАЮЩЕГО ШАРИКА

Цель работы: определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса.

Методика определения коэффициента вязкости методом падающего шарика

1. Измерить диаметр шарика (2) микрометром (6) в двух различных сечениях и записать его в таблицу 2.1.
2. Определить среднее значение диаметра D шарика и его радиус r .
3. Измерить расстояние L между метками по миллиметровке и записать его в таблицу 2.1.
4. Опустить шарик в жидкость. Включить секундомер (5) в момент прохождения шариком верхней метки (3). Выключить секундомер в момент прохождения шариком нижней метки (4).

5. Записать в таблицу значение времени t прохождения расстояния L между метками.

6. Повторить пункты 1–5 еще для двух шариков. Данные занести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты измерений и вычислений

| № опыта | $L, м$ | $D_1, м$ | $D_2, м$ | $D_{cp}, м$ | $r, м$ | $t, с$ | $\eta, Па \cdot с$ | $\eta_{cp}, Па \cdot с$ | $\Delta\eta/\eta, \%$ |
|---------|--------|----------|----------|-------------|--------|--------|--------------------|-------------------------|-----------------------|
| 1 | – | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | |
| 3 | – | | | | | | | | |

7. Определить по рабочей формуле (2.3) значение η для каждого шарика. Значение плотности материала шарика ρ_1 и жидкости ρ_2 приведены в таблице 2.2.

8. Вычислить среднее значение коэффициента вязкости η_{cp} .

9. Рассчитать относительную погрешность коэффициента вязкости по формуле:

$$\delta\eta = \frac{2\Delta r}{r} + \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta\rho_1}{\rho_1 - \rho_2} + \frac{\Delta\rho_2}{\rho_1 - \rho_2}, \quad (2.4)$$

где Δr ; Δt , ΔL , $\Delta\rho_1$ и $\Delta\rho_2$ – погрешности измерения соответствующих величин ($\Delta r = 0,01 \cdot 10^{-3}$ м; $\Delta t = 0,01$ с; $\Delta L = 0,5 \cdot 10^{-2}$ м.).

Таблица 2.2 – Плотности веществ

| Вещества, жидкости | $\rho, кг/м^3$ | $\Delta\rho, кг/м^3$ |
|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Глицерин | $1,240 \cdot 10^3$ | $0,005 \cdot 10^3$ |
| Касторовое масло | $0,960 \cdot 10^3$ | $0,005 \cdot 10^3$ |
| Трансформаторное масло | $0,880 \cdot 10^3$ | $0,005 \cdot 10^3$ |
| Веретенное масло | $0,890 \cdot 10^3$ | $0,005 \cdot 10^3$ |
| Сталь | $7,800 \cdot 10^3$ | $0,005 \cdot 10^3$ |
| Стекло | $2,800 \cdot 10^3$ | $0,005 \cdot 10^3$ |
| Керамика | $2,450 \cdot 10^3$ | $0,005 \cdot 10^3$ |
| Пластик | $1,830 \cdot 10^3$ | $0,005 \cdot 10^3$ |

10. Вычислить абсолютную погрешность измерений по формуле:

$$\Delta\eta = \eta_{cp} \cdot \delta\eta \quad (2.5)$$

11. Записать окончательный результат в виде:

$$\eta = (\eta_{cp} \pm \Delta\eta) Па \cdot с \quad \text{при } \delta\eta = \dots \%$$

Контрольные вопросы

1. Объясните физически, почему возникает явление вязкости в жидкости и газе.
2. Какие силы действуют на шарик, движущийся в вязкой жидкости, как они направлены и чему равны?
3. Как зависит скорость падения шарика в вязкой жидкости от его радиуса и времени падения?
4. От чего зависит коэффициент вязкости?
5. Как и почему изменяется коэффициент вязкости с ростом температуры?
6. В чем заключается закон Стокса?
7. Дайте определение коэффициента вязкости жидкости.
8. Выведите единицу измерения коэффициента вязкости.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ К РАБОТЕ 2.2

Адиабатическими называются процессы, происходящие без теплообмена с окружающей средой.

Адиабатический процесс описывается уравнением Пуассона:

$$P \cdot V^\gamma = const, \quad (2.6)$$

где P – давление; V – объем; γ – показатель адиабаты, который в настоящей работе требуется определить.

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v},$$

где C_p – молярная теплоемкость при постоянном давлении;

C_v – молярная теплоемкость при постоянном объеме.

Молярной теплоемкостью называется величина, равная количеству теплоты, которую надо сообщить 1 молю вещества, чтобы повысить его температуру на 1К. Величина теплоемкости зависит от способа, которым системе сообщается тепло.

Можно показать, что

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{iR/2 + R}{iR/2} = \frac{i+2}{i} \quad (2.7)$$

где i – число степеней свободы (число независимых координат, определяющих положение молекулы в пространстве), R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,31$ Дж/(К·моль).

Число степеней свободы i зависит от строения молекулы газа.

Если газ:

- одноатомный: $i = 3$ (три степени свободы поступательного движения);
- двухатомный: $i = 5$ (три степени свободы поступательного движения, две степени свободы вращательного движения);
- трехатомный и более: $i = 6$ (три степени свободы поступательного движения и три степени свободы вращательного движения).

Первое начало термодинамики является выражением закона сохранения и изменения энергии применительно к термодинамике.

Формулируется он так: количество теплоты Q , сообщаемое телу, идет на увеличение его внутренней энергии ΔU и на совершение телом работы A против внешних сил:

$$Q = \Delta U + A \quad (2.8)$$

В случае адиабатического процесса $Q=0$ и первое начало термодинамики принимает вид:

$$A = -\Delta U \quad (2.9)$$

Знак минус показывает, что при адиабатическом расширении система совершает работу за счет своей внутренней энергии.

РАБОТА 2.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ ВОЗДУХА

Цель работы: использование метода Клемана–Дезорма для экспериментального определения отношения молярных теплоемкостей воздуха при постоянном давлении и постоянном объеме.

Описание установки

Для определения показателя адиабаты воздуха используется установка, представленная на рисунке 2.2. Она состоит из двух блоков. В нижнем блоке находится рабочий металлический сосуд, емкостью 3,5 л, совмещенный с компрессором. Компрессор предназначен для создания добавочного давления в рабочем сосуде, он включается переключателем «Компрессор» (2), установленным на передней панели установки. Кран К1 (3) предотвращает сброс давления из рабочего сосуда после остановки компрессора. Пневмотумблер «Атмосфера» (4) позволяет на короткое время соединять рабочий сосуд с атмосферой. Давление в колбе измеряется дифференциальным датчиком давления (5). В установке также предусмотрен контроль температуры (измеритель температуры 6) как внутри колбы, так и снаружи. Подключение установки осуществляется выключателем 1.

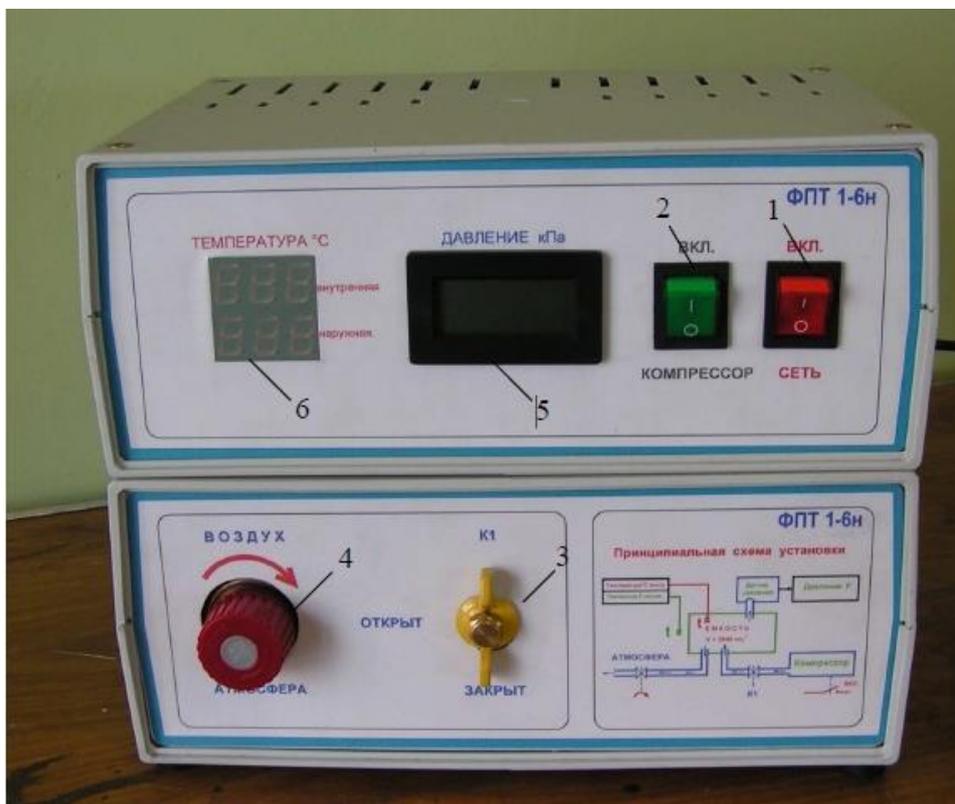


Рисунок 2.2 – Общий вид экспериментальной установки

При накачивании в рабочий сосуд некоторого количества воздуха с помощью компрессора давление и температура воздуха внутри сосуда повысятся. Вследствие теплообмена воздуха с окружающей средой через некоторое время температура воздуха, находящегося в баллоне, сравняется с температурой внешней среды t_1 . При этом давление, установившееся в сосуде, равно

$$p_1 = p_0 + \Delta p_1,$$

где p_0 – атмосферное давление; Δp_1 – добавочное давление.

Состояние воздуха внутри баллона (состояние 1) характеризуется термодинамическими параметрами: p_1 , V_1 и t_1 .

Если открыть на короткое время пневмотумблер «Атмосфера», то воздух в баллоне будет расширяться. Этот процесс расширения можно считать адиабатическим, т.е. протекающим без теплообмена с окружающей средой. При этом давление газа уменьшается и достигает атмосферного, температура также понижается (расширяясь, газ совершает работу против атмосферного давления за счет уменьшения внутренней энергии) и оказывается ниже комнатной. В конце адиабатического процесса (состояние 2) параметры воздуха будут p_0 , V_2 и t_2 . Применяя к состояниям 1 и 2 уравнение Пуассона для адиабатического процесса, получим:

$$(p_0 + \Delta p_1) \cdot V_1^\gamma = p_0 \cdot V_2^\gamma, \quad (2.10)$$

$$\left(\frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma = \frac{p_0}{(p_0 + \Delta p_1)} \quad (2.11)$$

Охладившийся при расширении воздух в сосуде через некоторое время вследствие теплообмена нагреется до температуры внешней среды t_1 : давление возрастет до некоторой величины:

$$p_2 = p_0 + \Delta p_2,$$

где Δp_2 – новое добавочное давление.

Поскольку объём воздуха не изменится и останется равным V_2 , то состояние воздуха (состояние 3) характеризуется параметрами: p_2, V_2 и t_1 . Так как в 1 и 3 состояниях воздух имеет одну и ту же температуру, то $p_1 V_1 = p_2 V_2$:

$$(p_0 + \Delta p_1) \cdot V_1 = (p_0 + \Delta p_2) \cdot V_2, \quad (2.12)$$

откуда:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{p_0 + \Delta p_2}{p_0 + \Delta p_1} \quad (2.13)$$

Возведя обе части уравнения (2.12) в степень γ :

$$\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\gamma = \left(\frac{p_0 + \Delta p_2}{p_0 + \Delta p_1}\right)^\gamma \quad (2.14)$$

пользуясь выражениями (2.11) и (2.14), получим:

$$\frac{p_0}{(p_0 + \Delta p_1)} = \left(\frac{p_0 + \Delta p_2}{p_0 + \Delta p_1}\right)^\gamma \quad (2.15)$$

Логарифмируя (2.15) и решая получившееся уравнение относительно γ , находим:

$$\gamma = \frac{\lg(p_0 + \Delta p_1) - \lg p_0}{\lg(p_0 + \Delta p_1) - \lg(p_0 + \Delta p_2)} \quad (2.16)$$

Так как давления $p_0, p_0 + \Delta p_1$ и $p_0 + \Delta p_2$ в условиях опыта мало отличаются друг от друга, можно показать, что разности логарифмов приблизительно равны разностям самих давлений:

$$\gamma = \frac{(p_0 + \Delta p_1) - p_0}{(p_0 + \Delta p_1) - (p_0 + \Delta p_2)}, \quad (2.17)$$

или

$$\gamma = \frac{\Delta p_1}{\Delta p_1 - \Delta p_2} \quad (2.18)$$

Методика определения показателя адиабаты воздуха

1. Включить установку в сеть. Тумблером «Сеть» включить прибор, кран (К1) выставить в положение «Открыт».

2. С помощью компрессора поднять давление в ёмкости до показаний 9,00 – 10,00 кПа (индикатор давления 5), выключить компрессор и быстро кран (К1) перевести в положение «Закрывает».

3. Дождаться стабилизации давления (давление будет падать) на индикаторе давления. Показание датчика давления записать в таблицу 2.3 (графа P₁).

4. Резко повернуть ручку «Атмосфера» (4) по часовой стрелке и дождаться стабилизации давления (давление будет расти) на индикаторе давления. Показания давления записать в таблицу 2.3 (графа P₂).

Таблица 2.3 – Результаты измерений и вычислений

| № опыта | ΔP_1 , кПа | ΔP_2 , кПа | γ | γ_{cp} | $\Delta\gamma$ | $\Delta\gamma_{cp}$ | $\delta\gamma = \Delta\gamma_{cp} / \gamma_{cp} \cdot 100\%$ |
|---------|--------------------|--------------------|----------|---------------|----------------|---------------------|--------------------------------------------------------------|
| 1 | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | |

5. Кран (К1) перевести в положение «Открыт». Поворотом ручки «Атмосфера» по часовой стрелке сбросить давление.

6. Повторить эксперимент не менее 5 раз.

7. По рабочей формуле (2.18) вычислить показатель адиабаты для каждого опыта. Определить среднее значение показателя адиабаты, абсолютную и относительную погрешности.

8. Записать окончательный результат в виде:

$$\gamma = (\gamma_{cp} \pm \Delta\gamma), \quad \text{при } \delta\gamma = \dots \%$$

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте и запишите первое начало термодинамики.
2. Что такое адиабатический процесс?
3. Запишите уравнение Пуассона.
4. Как практически может быть реализован адиабатический процесс? Приведите примеры адиабатического процесса.
5. Какие процессы называются изотермическими? Какие процессы называются изохорическими? Какие законы описывают эти процессы?
6. Сформулируйте определения удельной и молярной теплоемкостей.
7. Почему теплоемкость газа при постоянном давлении отличается от его теплоемкости при постоянном объеме?
8. Какие газовые процессы используются в данной работе?
9. Выведите рабочую формулу, выражающую γ .
10. Что называется числом степеней свободы и от чего оно зависит?
11. Как выражаются теплоемкости C_p и C_v через число степеней свободы молекул газа?
12. Как выражается γ через число степеней свободы?

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ К РАБОТАМ 2.3 И 2.4

Жидкость, в отличие от газов, не заполняет весь объем сосуда, в котором она находится. Между жидкостью и газом образуется граница раздела, которая находится в особых условиях по сравнению с остальной массой жидкости. На рисунке 2.3 изображены молекула в пограничном слое жидкости (а) и молекула внутри жидкости (б).

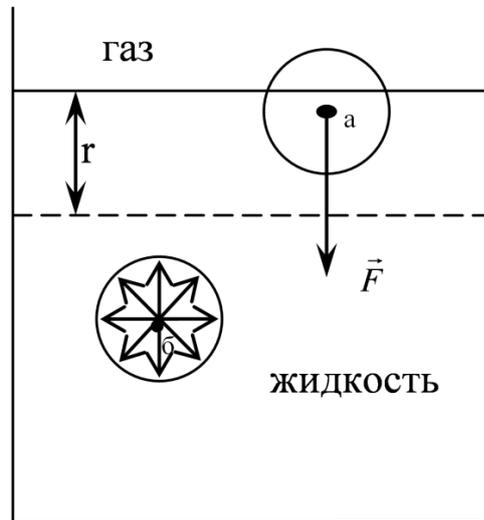


Рисунок 2.3 – Силы, действующие на молекулу в поверхностном слое жидкости (а) и молекулу внутри жидкости (б)

Молекула в глубине жидкости окружена другими молекулами той же жидкости со всех сторон. Силы межмолекулярного взаимодействия, действующие на каждую молекулу внутри жидкости (б) со стороны соседних молекул, в среднем взаимно скомпенсированы. Любая молекула в пограничном слое (а) притягивается молекулами, находящимися внутри жидкости (силами, действующими на данную молекулу жидкости со стороны молекул газа можно пренебречь). В результате появляется некоторая равнодействующая сила, направленная вглубь жидкости. Поверхностные молекулы силами межмолекулярного притяжения втягиваются внутрь жидкости. Но все молекулы, в том числе и молекулы пограничного слоя, должны находиться в состоянии равновесия. Это равновесие достигается за счет некоторого уменьшения расстояния между молекулами поверхностного слоя и их ближайшими соседями внутри жидкости. При уменьшении расстояния между молекулами возникают силы отталкивания. Если среднее расстояние между молекулами внутри жидкости равно r_0 , то молекулы поверхностного слоя упакованы несколько более плотно, а поэтому они обладают дополнительным запасом потенциальной энергии по сравнению с внутренними молекулами.

Переход молекулы из глубины жидкости в поверхностный слой сопровождается совершением работы против действующих в поверхностном слое сил. Эта работа совершается молекулой за счет запаса ее кинетической энергии и идет на увеличение потенциальной энергии молекулы. Молекулы в поверхностном слое обладают дополнительной потенциальной энергией. Поскольку положение равновесия соответствует минимуму потенциальной

энергии, жидкость, предоставленная самой себе, будет уменьшать свою поверхность до минимально возможной величины. Это означает, что существуют направленные по касательной к поверхности силы поверхностного натяжения F_n , стремящиеся уменьшить площадь поверхности жидкости. Сила поверхностного натяжения перпендикулярна к участку контура, на который она действует, причем:

$$F_n = \sigma \cdot \ell, \quad (2.19)$$

где ℓ – длина контура, ограничивающего поверхность жидкости;
 σ – коэффициент поверхностного натяжения.

Коэффициентом поверхностного натяжения называется сила, действующая на единицу длины контура поверхности жидкости. При увеличении температуры коэффициент поверхностного натяжения уменьшается вследствие уменьшения сил межмолекулярного взаимодействия. Примеси оказывают сильное влияние на величину поверхностного натяжения. Например, растворение в воде мыла уменьшает ее коэффициент поверхностного натяжения почти в полтора раза, а растворение в воде поваренной соли $NaCl$ приводит к увеличению σ .

РАБОТА 2.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ МЕТОДОМ ОТРЫВА КОЛЬЦА

Цель работы: Исследование явления поверхностного натяжения, определение коэффициента поверхностного натяжения воды методом отрыва кольца.

Теоретическое введение

Для определения коэффициента поверхностного натяжения в данной работе используется метод отрыва кольца. Экспериментальная установка, показана на рисунке 2.4.

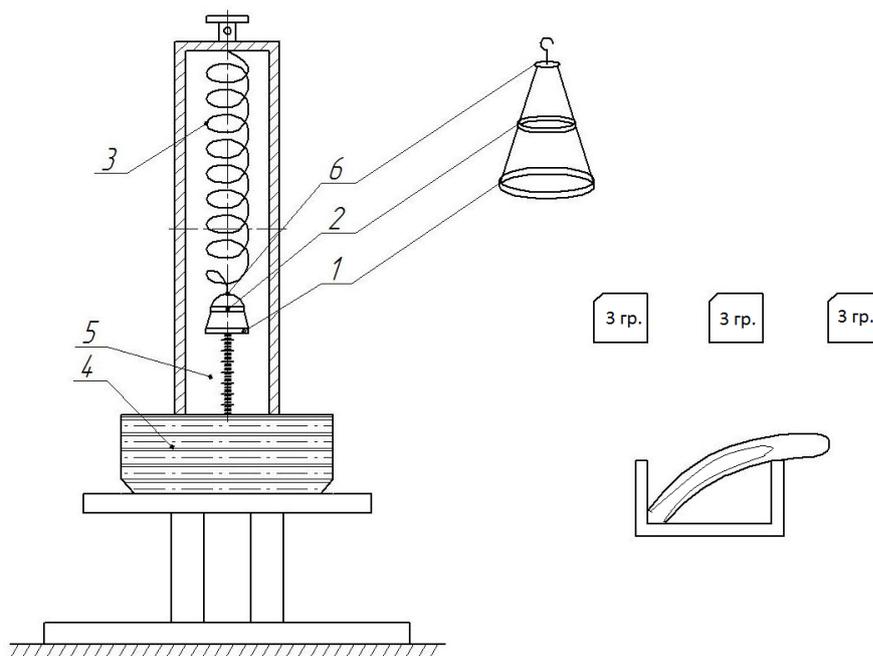


Рисунок 2.4 – Схема экспериментальной установки

При погружении металлического кольца 1 определенного диаметра, подвешенного на спиральной пружине 3 в исследуемую жидкость 4, появится взаимодействие молекул жидкости и кольца (плоскость кольца должна быть строго параллельна поверхности жидкости).

Чтобы оторвать кольцо от жидкости, нужно приложить силу P , достаточную для разрыва поверхностной пленки жидкости. В момент отрыва эта сила P равна силе поверхностного натяжения:

$$P = F = \sigma \cdot L, \quad (2.20)$$

где L – длина линии разрыва, т.е. суммарная длина наружной и внутренней окружностей кольца.

Толщина стенок кольца настолько мала, что ею можно пренебречь. Поэтому можно считать, что длина линии разрыва:

$$L = 2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot r) = 2 \cdot \pi \cdot D, \quad (2.21)$$

где D – диаметр кольца (принимается = 0,05 м).

Из уравнений (2.20) и (2.21), получим:

$$\sigma = \frac{P}{2\pi D} \quad (2.22)$$

Таким образом, для определения коэффициента поверхностного натяжения достаточно измерить силу отрыва кольца P .

Методика определения коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом отрыва кольца

Работа состоит из двух частей: градуировки пружинных весов и определения силы отрыва кольца P .

I. Градуировка пружинных весов

1. Определить по зеркальной шкале 5 положение L_0 указателя 6 в отсутствие нагрузки в чашке 2 (при пользовании зеркальной шкалой выбрать угол зрения таким образом, чтобы указатель и его изображение в зеркале налагались друг на друга).

2. Нагрузить чашку 2 кольца разновесами, имеющими массу m_1 (по указанию преподавателя), определить соответствующее положение указателя 6 – L_1 . Записать данные в таблицу 2.4.

3. Добавить разновесы, записать новую массу m_2 и измерить положение указателя L_2 .

4. Повторить п.3 для массы m_3 .

4. Определить для каждой нагрузки удлинение пружины $x_i = (L_i - L_0)$.

5. Вычислить для каждой нагрузки коэффициент жесткости пружины по формуле:

$$\beta_i = \frac{m_i \cdot g}{x_i} \quad (2.23)$$

6. Вычислить среднее значение коэффициента жесткости пружины по формуле:

$$\beta_{cp} = \frac{\beta_1 + \beta_2 + \beta_3}{3} \quad (2.24)$$

7. Определить случайную абсолютную погрешность по формуле:

$$\Delta\beta_{cp} = \frac{\Delta\beta_1 + \Delta\beta_2 + \Delta\beta_3}{3} \quad (2.25)$$

Таблица 2.4 – Результаты измерений и вычислений для градуировки пружины

| № п/п | m_i , кг | L_0 , м | L_i , м | β , Н/м | β_{cp} , Н/м | $\Delta\beta_i$, Н/м | $\Delta\beta_{cp}$, Н/м |
|-------|------------|-----------|-----------|---------------|--------------------|-----------------------|--------------------------|
| 1 | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |

II. Определение силы отрыва кольца

1. Установить нижнее основание кольца горизонтально.
2. Поднять сосуд с водой так, чтобы кольцо опустилось своим нижним основанием в жидкость.
3. Медленно опускать сосуд, внимательно следя за указателем, и отметить его положение в момент отрыва кольца от поверхности жидкости.
4. Опыт по определению положения указателя в момент отрыва кольца проделать 3 раза. Записать результаты в таблицу 2.5
5. Найти силу отрыва кольца P по формуле:

$$P = \beta_{cp} \cdot (L_{отпр} - L_0)_{cp} \quad (2.26)$$

6. Определить по рабочей формуле (2.22) коэффициент поверхностного натяжения.

Таблица 2.5 – Результаты измерений и вычислений

| № п/п | L_0 , м | $L_{отпр}$, м | $(L_{отпр} - L_0)$, м | $(L_{отпр} - L_0)_{cp}$, м | $\Delta(L_{отпр} - L_0)$, м | $\Delta(L_{отпр} - L_0)_{cp}$, м | P , Н | σ , Н/м |
|-------|-----------|----------------|------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------------|---------|----------------|
| 1 | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | |

7. Рассчитать относительную погрешность результатов по формуле:

$$\delta\sigma = \frac{\Delta\beta}{\beta_{cp}} + \frac{\Delta(L_{ompi} - L_0)_{cp}}{(L_{ompi} - L_0)} + \frac{\Delta D}{D} \quad (2.27)$$

где $\Delta D = 0,0005$

8. Определить абсолютную погрешность по формуле:

$$\Delta\sigma = \sigma_{cp} \cdot \delta\sigma$$

9. Записать окончательный результат в виде:

$$\sigma = (\sigma_{cp} \pm \Delta\sigma) \text{ Н / м} \quad \text{при } \delta\sigma = \dots\%$$

Контрольные вопросы

1. Какова природа внутреннего давления в жидкости?
2. Почему поверхностный слой жидкости находится в состоянии натяжения?
3. Что такое сила поверхностного натяжения, как она направлена и от чего зависит?
4. Что называется коэффициентом поверхностного натяжения и какова его размерность?
5. Как изменяется коэффициент поверхностного натяжения в зависимости от изменения температуры?
6. Выведите рабочую формулу для определения коэффициента поверхностного натяжения жидкости.

РАБОТА 2.4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ ОТРЫВА КАПЕЛЬ

Цель работы: определение коэффициента поверхностного натяжения неизвестной жидкости по коэффициенту поверхностного натяжения известной жидкости.

Теоретическое введение

Работа основана на сравнении силы поверхностного натяжения, удерживающей каплю от падения, с силой тяжести, под действием которой отрывается капля. Приборы: бюретка и бутылочки с исследуемыми жидкостями.

Если из бюретки капает жидкость (рисунок 2.5), то капля отрывается только тогда, когда ее вес P становится немного больше или в предельном случае равен силе поверхностного натяжения F , удерживающей каплю от падения. Таким образом, в момент отрыва капли получаем условие: $P=F$.

В соответствии с формулой (2.20) имеем:

$$F = 2\pi \cdot r \cdot \sigma \quad (2.28)$$

где $2\pi r$ – длина окружности шейки капли в момент отрыва; σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости. Тогда получим:

$$P = 2\pi \cdot r \cdot \sigma \quad (2.29)$$

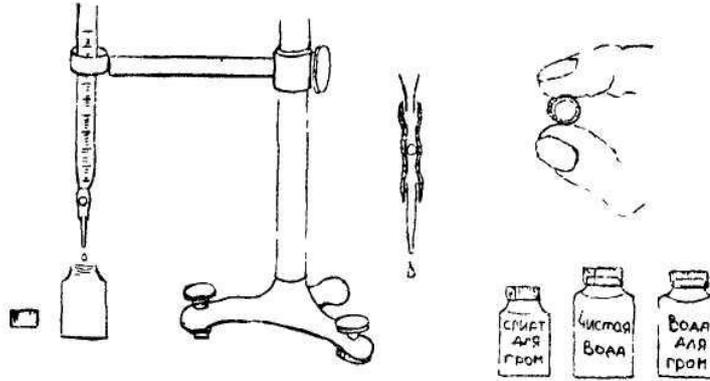


Рисунок 2.5 – Схема экспериментальной установки

Однако, ввиду того, что радиус шейки отрывающейся капли определить трудно, поступают следующим образом. Берут две разные жидкости, одну с известным коэффициентом поверхностного натяжения σ_1 , например, воду, другую с неизвестным коэффициентом поверхностного натяжения σ_2 , подлежащим определению (спирт).

Пусть некоторый объем V содержит n_1 капель первой жидкости плотностью ρ_1 и n_2 капель второй жидкости плотностью ρ_2 . Вес каждой капли обозначим, соответственно, P_1 и P_2 . Тогда:

$$\rho_1 \cdot V \cdot g = n_1 \cdot P_1 = n_1 \cdot 2\pi \cdot r \cdot \sigma_1 \quad (2.30)$$

$$\rho_2 \cdot V \cdot g = n_2 \cdot P_2 = n_2 \cdot 2\pi \cdot r \cdot \sigma_2 \quad (2.31)$$

где g – ускорение свободного падения ($9,81 \text{ м/с}^2$).

Приравняв выражения для объема V , найденные из формул (2.30) и (2.31), получим:

$$\frac{n_1 \cdot 2\pi \cdot r \cdot \sigma_1}{\rho_1 \cdot g} = \frac{n_2 \cdot 2\pi \cdot r \cdot \sigma_2}{\rho_2 \cdot g}$$

Отсюда следует рабочая формула:

$$\sigma_2 = \frac{n_1 \cdot \rho_2}{n_2 \cdot \rho_1} \cdot \sigma_1 \quad (2.32)$$

**Методика определения коэффициента поверхностного натяжения
жидкости методом отрыва капель**

1. Промыть бюретку водой для промывки и наполнить ее жидкостью, коэффициент поверхностного натяжения которой известен.
2. Аккуратно нажимая на шарик в бюретке, добиться, чтобы жидкость медленно капала в подставленный сосуд, и установить уровень жидкости в бюретке на каком-либо определенном делении.
3. Сосчитать количество капель N жидкости в определенном объеме, указанном преподавателем, записать результат в таблицу 2.6.
4. Прodelать опыт три раза (каждый раз лучше выбирать разные объемы жидкости).
5. Вылить из бюретки жидкость и промыть ее той жидкостью, коэффициент поверхностного натяжения которой будет определяться.
6. Наполнить бюретку этой жидкостью и прodelать с ней аналогичные измерения (пункты 2–4).

Таблица 2.6 – Результаты измерений и вычислений

| № п/п | $V, \text{ см}^3$ | N_1 | $n_1, \text{ 1/ см}^3$ (вода) | $n_{1cp}, \text{ 1/ см}^3$ (вода) | N_2 | $n_2, \text{ 1/ см}^3$ (спирт) | $n_{2cp}, \text{ 1/ см}^3$ (спирт) | $\sigma_2, \text{ Н/м}$ (спирт) |
|-------|-------------------|-------|----------------------------------|--------------------------------------|-------|-----------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| 1 | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | |

7. Выписать из таблицы 2.7 значения плотностей ρ_1 и ρ_2 , а также коэффициента поверхностного натяжения первой жидкости σ_1 из таблицы 2.8, соответствующие комнатной температуре.
8. Рассчитать число капель в единице объема n_1 и n_2 .
9. Найти средние значения n_{1cp} и n_{2cp} и вычислить σ_2 по рабочей формуле (2.32).
10. Определить относительную погрешность:

$$\delta\sigma_2 = \frac{\Delta n_1}{n_1} + \frac{\Delta n_2}{n_2}$$

где $\Delta n_1 = \Delta n_2 = 1$

11. Определить абсолютную погрешность:

$$\Delta\sigma_2 = \delta\sigma_2 \cdot \sigma_2$$

12. Записать окончательный результат в виде:

$$\sigma_2 = (\sigma_{2cp} \pm \Delta\sigma_2) \text{ Н / м при } \delta\sigma_2 = \dots\%$$

Таблица 2.7 – Плотность воды и спирта при различных температурах

| $t, ^\circ C$ | ρ_1 воды, г/см ³ | ρ_2 спирта, г/см ³ |
|---------------|----------------------------------|------------------------------------|
| 15 | 0,9991 | 0,792 |
| 16 | 0,9990 | 0,792 |
| 17 | 0,9988 | 0,791 |
| 18 | 0,9986 | 0,791 |
| 19 | 0,9984 | 0,790 |
| 20 | 0,9982 | 0,790 |
| 21 | 0,9980 | 0,789 |
| 22 | 0,9978 | 0,789 |
| 23 | 0,9976 | 0,788 |
| 24 | 0,9973 | 0,788 |
| 25 | 0,9970 | 0,787 |

Таблица 2.8 – Коэффициент поверхностного натяжения воды при различных температурах

| $t, ^\circ C$ | σ воды, Н/м |
|---------------|-----------------------|
| 15 | $73,26 \cdot 10^{-3}$ |
| 16 | $73,11 \cdot 10^{-3}$ |
| 17 | $72,96 \cdot 10^{-3}$ |
| 18 | $72,81 \cdot 10^{-3}$ |
| 19 | $72,67 \cdot 10^{-3}$ |
| 20 | $72,53 \cdot 10^{-3}$ |
| 21 | $72,37 \cdot 10^{-3}$ |
| 22 | $72,22 \cdot 10^{-3}$ |
| 23 | $72,08 \cdot 10^{-3}$ |
| 24 | $71,93 \cdot 10^{-3}$ |
| 25 | $71,78 \cdot 10^{-3}$ |

Контрольные вопросы

1. Какова природа внутреннего давления в жидкости?
2. Что такое сила поверхностного натяжения, как она направлена и от чего зависит?
3. Что называется коэффициентом поверхностного напряжения и какова его размерность?
4. От чего зависит коэффициент поверхностного натяжения?
5. Как зависит коэффициент поверхностного натяжения от температуры?
6. Как зависит коэффициент поверхностного натяжения раствора спирта в воде от концентрации спирта?
7. При каком условии капля отрывается от бюретки?

8. Выведите рабочую формулу для определения коэффициента поверхностного натяжения жидкости.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ К РАБОТЕ 2.5

Работа основана на удержании максимального количества жидкости от вытекания через небольшое отверстие из сосуда за счет сил поверхностного натяжения. Для проведения работы используется сосуд с отверстием в стенке у его основания.

Если в сосуд налить некоторое количество жидкости (например, воду), то она начнет вытекать через имеющееся у основания сосуда отверстие вследствие избыточного гидростатического давления в нем по сравнению с давлением окружающей среды. По мере вытекания жидкости избыточное давление уменьшается и через определенное время оно сравняется с противодействием, создаваемым силами поверхностного натяжения, и вытекание из сосуда прекратится (см. рисунок 2.6.). Величина противодействия вследствие действия сил поверхностного натяжения определится по формуле:

$$P_H = \frac{2 \cdot \sigma}{R} . \quad (2.33)$$

Величина гидростатического давления равна:

$$P_G = \rho \cdot g \cdot h . \quad (2.34)$$

В формулах (2.33) и (2.34) использованы следующие обозначения: ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения; h – превышение уровня жидкости над центром отверстия в сосуде; σ – коэффициент поверхностного натяжения; R – радиус отверстия.

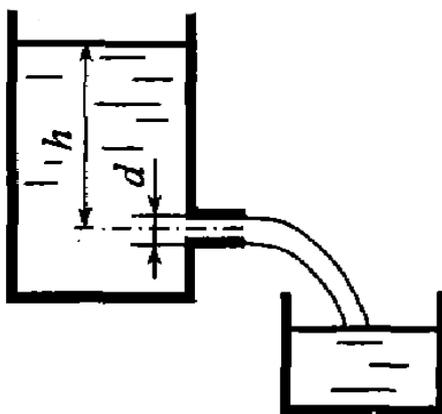


Рисунок 2.6 – Схема проведения опыта

Приравнивая выражения (2.33) и (2.34), найдем расчетную формулу для коэффициента поверхностного натяжения:

$$\sigma = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot R}{2} \quad (2.35)$$

Определим относительную погрешность σ , прологарифмировав формулу (2.35) по основанию натурального логарифма:

$$\ln \sigma = \ln \left(\frac{\rho \cdot g}{2} \right) + \ln h + \ln R$$

Далее полученное уравнение продифференцируем, полагая ρ и g постоянными:

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = \frac{dh}{h} + \frac{dR}{R} \quad (2.36)$$

При замене дифференциалов конечными приращениями, получим следующие формулы для определения относительной и абсолютной погрешностей:

$$\delta\sigma = \frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta R}{R} \quad (2.37)$$

$$\Delta\sigma = \sigma \cdot \delta\sigma \quad (2.38)$$

где $\Delta h = 0,0005$; $\Delta R = 0,00005$

РАБОТА 2.5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЗАКОНА ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Цель работы: знакомство с методом гидростатического давления для определения коэффициента поверхностного натяжения жидкости.

Методика определения коэффициента поверхностного натяжения с помощью закона гидростатического давления

1. Измерить диаметр отверстия, из которого вытекает вода из сосуда, и определить его радиус R .
2. Налить в сосуд воды так, чтобы уровень свободной поверхности был выше оси отверстия на 25–30 мм.
3. Предоставить возможность свободного истечения жидкости из сосуда, поставив его предварительно в чашку.
4. После прекращения истечения воды из отверстия сосуда произвести измерение высоты удерживаемого гидростатического столба воды h .
5. Подсчитать значение коэффициента поверхностного натяжения воды по формуле (2.35).
6. Определить по формуле (2.37) и (2.38) относительную и абсолютную погрешности измерений.

7. Добавить воды в сосуд и повторить опыт еще 2 раза.

8. Результаты расчетов и измерений занести в таблицу 2.9.

Таблица 2.9 – Результаты измерений и вычислений

| № опыта | h , м | h_{cp} , м | Δh , м | R , м | R_{cp} , м | ΔR , м | σ , Н/м | $\Delta\sigma$, Н/м | $\delta\sigma$, % |
|---------|---------|--------------|----------------|---------|--------------|----------------|----------------|----------------------|--------------------|
| 1 | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | |

Записать окончательный результат в виде:

$$\sigma = (\sigma_{cp} \pm \Delta\sigma) \text{ Н / м при } \delta\sigma = \dots\%$$

Контрольные вопросы

1. Объясните природу силы поверхностного натяжения.
2. Как определяется коэффициент поверхностного натяжения жидкости? Какая единица его измерения?
3. Назовите наблюдаемые в природе явления, объясняемые силами поверхностного натяжения?
4. Какие краевые эффекты можно наблюдать при соприкосновении жидкости со стенками сосуда?
5. Что называется мениском, какие формы мениска Вы знаете?
6. Что такое адсорбция, где это явление используется?
7. Какие явления называются капиллярными?
8. По какой формуле можно определить высоту подъема столба жидкости по капилляру?