

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ ИНСТИТУТ

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор АДИ ГОУВПО «ДонНТУ»

М.Н. Чальцев

24.11.2016 г.

Кафедра «Общенаучные дисциплины»

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ  
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
«ФИЗИКА» (РАЗДЕЛ «МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И  
ТЕРМОДИНАМИКА») ДЛЯ СТУДЕНТОВ НАПРАВЛЕНИЙ  
ПОДГОТОВКИ: 23.03.03 «ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТРАНСПОРТНО-  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН И КОМПЛЕКСОВ, 23.05.01  
«НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА»,  
08.03.01 «СТРОИТЕЛЬСТВО», 20.03.01 «ТЕХНОСФЕРНАЯ  
БЕЗОПАСНОСТЬ», 08.05.03 «СТРОИТЕЛЬСТВО, ЭКСПЛУАТАЦИЯ,  
ВОСТАНОВЛЕНИЕ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ПРИКРЫТИЕ  
АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ, МОСТОВ И ТОННЕЛЕЙ», 27.03.04  
«УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ», 23.03.01  
«ТЕХНОЛОГИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОЦЕССОВ».**

**15/12 – 2016 -01**

«РЕКОМЕНДОВАНО»

Учебно-методическая  
комиссия факультета  
«Автомобильные дороги»  
Протокол №3 от 16.11.16

«РЕКОМЕНДОВАНО»

Учебно-методическая  
комиссия факультета  
«Автомобильный транспорт»  
Протокол № 2 от 17.11.16

«РЕКОМЕНДОВАНО»

Кафедра  
«Общенаучные дисциплины»  
Протокол № 2 от 03.10.16

«РЕКОМЕНДОВАНО»

Учебно-методическая  
комиссия факультета  
«Транспортные технологии»  
Протокол № 3 от 16.11.2016

Горловка – 2017

УДК 536.7(07)

Учебно-методическое пособие к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Физика» (раздел «Молекулярная физика и термодинамика») для студентов направлений подготовки: 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства», 08.03.01 «Строительство», 20.03.01 «Техносферная безопасность», 08.05.03 «Строительство, эксплуатация, восстановление и техническое прикрытие автомобильных дорог, мостов и тоннелей», 27.03.04 «Управление в технических системах», 23.03.01 «Технология транспортных процессов» [Электронный ресурс] / составители: А. М. Галиахметов, М. П. Ефремова, В. В. Ставцев., У. В. Косенко. – Горловка: ГОУВПО «ДонНТУ» АДИ, 2017. – 60 с.

Содержит 8 лабораторных работ, методику их выполнения, вопросы и задачи для защиты. Приведены рекомендации для обработки экспериментальных данных с помощью ЭВМ.

Составители: Галиахметов А.М., д-р физ.-мат. наук, доц.  
Ефремова М.П., ст. преп.  
Ставцев В.В., ведущий инженер  
Косенко У.В., ст. лаборант

Ответственный за выпуск: Галиахметов А.М., д-р физ.-мат. наук, доц.

Рецензент: Сокирко В.Н., к.т.н., доц.

© Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Донецкий национальный технический университет»  
Автомобильно-дорожный институт, 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

Общие дидактические рекомендации .....	4
Лабораторная работа № 1 Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом отрыва капли.....	5
Лабораторная работа № 2 Определение $C_p/C_v$ для воздуха методом Клемана-Дезорма.....	10
Лабораторная работа № 3 Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса.....	17
Лабораторная работа № 4 Изучение на механической модели распределения молекул газа по компонентам скоростей .....	23
Лабораторная работа № 5 Исследование зависимости коэффициента поверхностного натяжения жидкости от их концентрации и температуры методом Ребиндера. ....	28
Лабораторная работа № 6 Определение средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул воздуха.....	33
Лабораторная работа № 7 Определение влажности воздуха аспирационным психрометром с электромотором М-34. ....	40
Лабораторная работа № 8 Определение постоянной Больцмана .....	50
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	53
Приложение А Обработка экспериментальных данных с помощью ЭВМ	54
Приложение Б Коэффициент Стьюдента $t_{\alpha,n}$ .....	55

## Общие

### дидактические рекомендации

«Молекулярная физика и термодинамика» – один из важных разделов физики, знание которого необходимо специалистам многих областей науки и техники.

Изучение этого раздела предполагает использование трех взаимосвязанных форм занятий: лекций, лабораторных работ и самостоятельной работы студентов. Теоретические знания, полученные студентами в курсе лекций и при самостоятельной работе, закрепляются и углубляются в лабораторном практикуме.

При выполнении работ необходимо соблюдать правила техники безопасности, уметь определять цену деления шкалы измерительных приборов, ориентировочно оценивать правильность полученных экспериментальных данных, рассчитывать погрешности измерений.

К выполнению лабораторной работы необходимо готовиться заранее: выучить теоретический материал данной темы по указанной литературе и конспекту лекций; подготовиться к выполнению экспериментов – внимательно изучить методические пособие к лабораторной работе, продумать ее выполнение и подготовить тетрадь для лабораторных работ.

Подготовку студента к лабораторной работе проверяет преподаватель и допускает к выполнению лабораторной работы.

В рабочей тетради для лабораторных работ указывают дату работы.

После выполнения экспериментальной части необходимо упорядочить свое рабочее место, оформить тетрадь для лабораторных работ (заполнить таблицы, ниже таблиц записать погрешности измерительных приборов, коэффициент Стьюдента, и т.д.) и данные подписать у преподавателя. Следует провести компьютерную обработку экспериментальных данных и распечатки подклеить в тетрадь для лабораторных работ. Оставшееся время лабораторного занятия используется студентом для защиты работы.

Работа считается защищенной после представления преподавателю отчета по экспериментальной части и по теории.

Статистическую обработку результатов эксперимента студент выполняет согласно существующим правилам.

## Лабораторная работа № 1

**Тема. Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом отрыва капли.**

**Цель.** Определить коэффициент поверхностного натяжения жидкости методом отрыва капли.

**Приборы и материалы.** Штатив, бюретка, аналитические весы, известная (эталонная) жидкость (дистиллированная вода), исследуемая жидкость (раствор глицерина, этиловый спирт и др.), сосуд (тигелек).

**Практическое значение.** Знание свойств жидкостей и их строения, необходимо для расчетов разных гидropневмоприводов, движения машин и их частей в воздушной и жидкой средах.

### Описание оборудования

Прибор для определения коэффициента поверхностного натяжения исследуемой жидкости методом отрыва капли (рисунок 1.1) состоит из бюретки, укрепленной на штативе. Нижний конец бюретки соединен со стеклянным наконечником резиновой трубки, в которой есть твердый шарик.

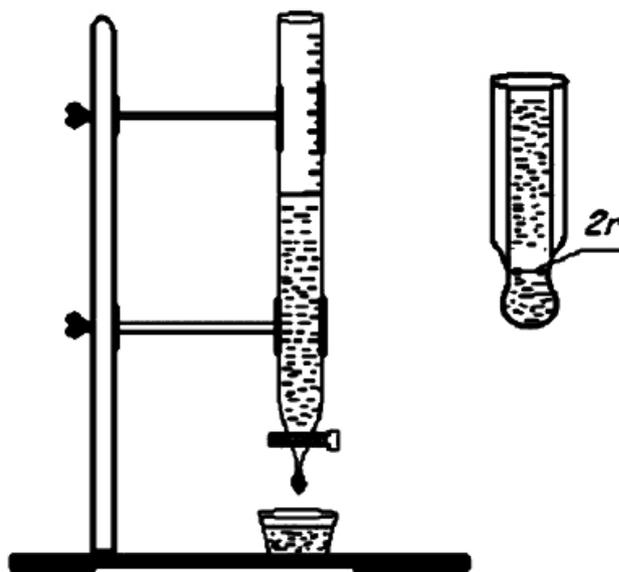


Рисунок 1.1 – Общий вид установки для определения коэффициента поверхностного натяжения

Если резину в месте нахождения шарика сжать пальцами, то жидкость, которая находится в бюретке, начинает просачиваться мимо шарика и вытекает каплями в тигелек (сосуд).

Для точного взвешивания необходимо применять аналитические весы марки АДВ-200.

### Краткие теоретические сведения

Свободная поверхность тел на границе фаз является причиной особого типа явлений, так называемых поверхностных явлений. Молекулы поверхностного слоя находятся в особом энергетическом состоянии по сравнению с молекулами объема жидкости. На самом деле, чтобы перевести молекулы жидкости из ее объема на поверхность (для увеличения поверхности жидкости), нужно выполнить работу против сил внутреннего давления. В состоянии устойчивого равновесия избыточная поверхностная потенциальная энергия жидкости должна быть минимальной. Поэтому жидкость, на которую не действуют внешние силы, при условии ее практической несжимаемости, должна принимать форму сферы. Таким образом, силы поверхностного слоя должны предопределять тенденцию жидкости уменьшать свою поверхность. Понятно, что эти силы должны быть направлены по касательным к поверхности жидкости.

**Коэффициентом поверхностного натяжения**  $\alpha$  называют величину, которая численно равна отношению силы  $F$ , действующей на участок контура поверхности жидкости, к длине  $\ell$  этого участка:

$$\alpha = F / \ell. \quad (1.1)$$

Подставив в (1.1)  $F=1\text{Н}$ ,  $\ell=1\text{ м}$ , получаем единицу коэффициента поверхностного натяжения  $[\alpha]=\text{Н/м}$ .

Возможен также энергетический подход к толкованию коэффициента поверхностного натяжения на границе двух фаз. Для увеличения поверхности жидкости нужно выполнить работу против сил поверхностного натяжения. Эту работу  $\Delta A$  при обратном изотермическом процессе можно выразить формулой:

$$\Delta A = \alpha \Delta S, \quad (1.2)$$

где  $\alpha$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости,

$\Delta S$  – изменение площади поверхности жидкости.

На практике одним из распространенных методов измерения  $\alpha$  является метод отрыва капель.

При сравнительно небольшой скорости вытекания жидкости из узкой трубки образуется капля почти сферической формы. Перед отрывом капли возникает «нить» по которой происходит разрыв. Пусть диаметр «нити» в момент отрыва капли равняется  $2r$  (на рисунке 1.1 капля изображена значительно увеличенной правее от прибора).

Если жидкость вытекает из нижнего конца вертикальной трубки, то линией разрыва поверхности жидкости при отрыве капли будет периметр шейки капли, которая образуется при этом. Периметр равняется  $2\pi r$ , где

$r$  – радиус шейки капли в наиболее узкой части. Капля находится под действием двух сил: ее собственного веса  $P$  и противоположно направленной силы поверхностного натяжения  $F$ , которая стремится вогнуть каплю внутрь трубки. Сила поверхностного натяжения равна  $F = 2\pi r\alpha$ , где  $\alpha$  – коэффициент поверхностного натяжения. Указанные выше силы в момент отрыва капли между собой равны, т. е.  $P = F$  или

$$P = 2\pi r\alpha. \quad (1.3)$$

Таким образом, определение коэффициента поверхностного натяжения сводится к определению веса капли и радиуса ее шейки в момент отрыва.

Вес капли находится путем взвешивания в каком-нибудь сосуде некоторого числа (50–100) капель исследуемой жидкости. Если вес этого сосуда обозначить через  $P_0$ , а его вес с  $n_1$  каплями исследуемой жидкости обозначить через  $P_1$ , то вес одной капли

$$P' = \frac{P_1 - P_0}{n_1}. \quad (1.4)$$

Принимая радиус шейки отрывающихся капель для исследуемой и известной жидкости с достаточной степенью точности одинаковыми, можно найти коэффициент поверхностного натяжения  $\alpha_1$  исследуемой жидкости. Берут другую жидкость с известным коэффициентом поверхностного натяжения  $\alpha_2$  (такой жидкостью обычно бывает дистиллированная вода). Обозначив вес тигелька  $P_0$  с  $n_2$  каплями воды через  $P_2$ , найдем вес одной капли воды

$$P'_в = \frac{P_2 - P_0}{n_2}. \quad (1.5)$$

Подставляя в формулу (1.3) полученное выражение для веса исследуемой капли (1.4), потом известной жидкости (1.5), получим уравнение:

$$\frac{P_1 - P_0}{n_1} = 2\pi r_1 \alpha_1; \quad \frac{P_2 - P_0}{n_2} = 2\pi r_2 \alpha_2. \quad (1.6)$$

Из (1.6) выражаем  $r_1$  и  $r_2$ :

$$r_1 = \frac{P_1 - P_0}{2\pi\alpha_1 n_1}; \quad r_2 = \frac{P_2 - P_0}{2\pi\alpha_2 n_2}. \quad (1.7)$$

Учитывая, что  $r_1 = r_2$ , поэтому

$$\frac{P_1 - P_0}{2\pi\alpha_1 n_1} = \frac{P_2 - P_0}{2\pi\alpha_2 n_2}. \quad (1.8)$$

Отсюда получаем для коэффициента поверхностного натяжения исследуемой жидкости формулу

$$\alpha_1 = \frac{(P_1 - P_0)n_2}{(P_2 - P_0)n_1} \cdot \alpha_2. \quad (1.9)$$

### Порядок выполнения работы

1. Предварительно, вытерев насухо сосуд, взвесить его; обозначить вес как  $P_0$ .
2. Промыв бюретку исследуемой жидкостью, наполнить ее этой же жидкостью.
3. Отсчитать в сосуд 50–100 капель исследуемой жидкости. Взвесить на тех же весах сосуд с отсчитанными каплями жидкости. Пусть вес жидкости с тигельком будет  $P_1$ .
4. Заменить исследуемую жидкость дистиллированной водой и аналогичным образом отсчитать 50–100 капель воды и взвесить ее вместе с тигельком. Пусть вес сосуда и отсчитанных капель воды будет  $P_2$ .
5. Измерить комнатную температуру. Найти табличное значение коэффициента поверхностного натяжения воды при температуре опыта.
6. Результаты измерений записать в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Результаты измерений

№	Вес тигелька $P_0, \text{г}$	Вес тигелька и исследуемой жидкости, $P_1, \text{г}$	Вес тигелька и воды, $P_2, \text{г}$	Число капель	
				Исследуемой жидкости, $n_1$	Воды $n_2$
1					
2					
3					
Ср. знач.					

Ниже таблицы запишите систематические (приборные) ошибки измерений:

Вес сосуда –  $\Delta P_0 =$

Вес сосуда с исследуемой жидкостью –  $\Delta P_1 =$

Вес сосуда с дистиллированной водой (известной жидкостью) –  $\Delta P_2 =$

Количество опытов –  $n =$

Доверительная вероятность –  $\alpha =$

Коэффициент Стьюдента –  $t_{\alpha,n} =$

Формула для расчетов относительной систематической ошибки коэффициента поверхностного натяжения исследуемой жидкости:

$$E = \frac{\Delta\alpha_1}{\alpha_{1(\text{пр})}} = \mp \left( \frac{\Delta P_1 + \Delta P_0}{P_1 - P_0} + \frac{\Delta P_2 + \Delta P_0}{P_2 - P_0} \right). \quad (1.10)$$

Эту формулу необходимо уметь получать каждому студенту, имея расчетную формулу (1.9).

### Обработка результатов измерений

1. Статистическую обработку результатов экспериментов провести согласно существующим правилам.

2. Окончательный результат представить в виде:

$$\alpha = (\alpha_{\text{ср}} \mp \Delta\alpha_1), \text{ Дин / см}, \quad (1.11)$$

где

$$\Delta\alpha_1 = \sqrt{(\Delta\alpha_{1(\text{пр})})^2 + (\Delta\alpha_{1(\text{сл})})^2}. \quad (1.12)$$

### Контрольные вопросы и задачи

1. Что называется коэффициентом поверхностного натяжения? Его единицы измерения в системе СИ.

2. От чего зависит коэффициент поверхностного натяжения?

3. Почему при отсутствии внешних сил капля жидкости приобретает форму сферы?

4. Свойства жидкости.

5. Опишите характер теплового движения молекул в жидкости. Понятие близкого и далекого порядка.

6. Давление Лапласа (дополнительное давление под искривленной поверхностью жидкости).

7. Явление смачивания. Его учет в технике.

8. Капиллярные явления, их применимость.

9. Как определяется высота поднятия жидкости в капиллярной трубке?

10. Что называется коэффициентом сжатия жидкости? Его единицы измерения.

11. Решить задачи 7.41, 7.42, 7.43, 7.44 [5].

## Лабораторная работа 2

**Тема. Определение  $C_p/C_v$  для воздуха методом Клемана-Дезорма.**

**Цель.** Определить отношение теплоемкости воздуха при постоянном давлении к теплоемкости воздуха при постоянном объеме методом Клемана-Дезорма, научиться правильно пользоваться манометром, насосом, вести расчеты ошибок.

**Приборы и материалы.** Стеклоанный баллон, манометр, насос, клапан, термометр, барометр.

**Практическое значение.** Исследуемые процессы лежат в основе работы двигателей внутреннего сгорания.

### Описание оборудования

Установка для опыта состоит из стеклянного баллона С, соединенного с открытым U-подобным манометром М, насосом Н, клапаном А (рисунок 2.1)

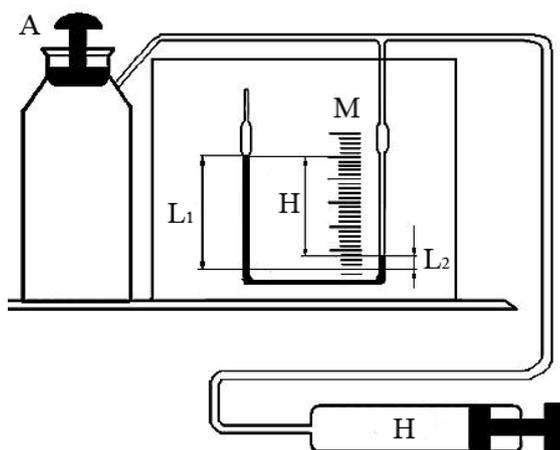


Рисунок 2.1 – Общий вид установки для определения  $C_p / C_v$

### Краткие теоретические сведения

Газ, который содержится в баллоне, проходит последовательно три состояния. Первое – характеризуется параметрами  $P_1, V_1, T_1$ ; второе –  $P_2, V_2, T_2$ , третье –  $P_3, V_3, T_3$ . Переход из первого состояния во второе происходит путем адиабатного расширения и описывается уравнением Пуассона:

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma. \quad (2.1)$$

Через 3–4 мин после закрытия клапана воздух нагревается изохорно при комнатной температуре  $T_1$ , причем давление повышается до величины  $P_3$ , (состояние 3 на рисунке 2.2).

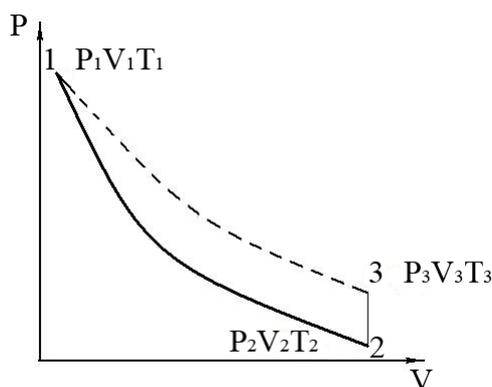


Рисунок 2.2 – График зависимости  $P$  от  $V$   
(клапан А закрывается в момент окончания адиабатного процесса 1–2)

Сравнивая конечное состояние газа с первым состоянием, можно увидеть, что точки 1 и 3 лежат на одной изотерме. Закон Бойля – Мариотта имеет вид:

$$P_1 V_1 = P_3 V_3, \quad (2.2)$$

причем

$$V_2 = V_3.$$

Из уравнений (2.1) и (2.2) можно определить показатель адиабаты  $\gamma$ . Для этого возводим уравнение (2.2) в степень  $\gamma$  и поделим его на уравнение (2.1):

$$\frac{P_1^\gamma V_1^\gamma}{P_1 V_1} = \frac{P_3^\gamma V_3^\gamma}{P_2 V_2} \quad \text{или} \quad \frac{P_1^\gamma}{P_1} = \frac{P_3^\gamma}{P_2},$$

откуда

$$\left( \frac{P_3}{P_1} \right)^\gamma = \frac{P_2}{P_1}. \quad (2.3)$$

Логарифмируя последнее выражение, находим искомый коэффициент

$$\gamma = \frac{\lg(P_2 / P_1)}{\lg(P_3 / P_1)}. \quad (2.4)$$

Обозначим разность уровней жидкости в манометре в первом состоянии через  $H_1$  и в третьем состоянии через  $h_0$ . В таком случае:

$$P_1 = P_2 + \alpha H_1; \quad P_3 = P_2 + \alpha h_0, \quad (2.5)$$

где  $\alpha$  – переводной коэффициент для перехода от разности уровней к давлению.

В каждом из выражений (2.5) второе слагаемое в правой части меньше по сравнению с первым слагаемым.



Если же клапан закрыт спустя некоторое время после завершения процесса 1–2, то за это время температура в баллоне немного повысится за счет теплообмена с внешней средой (изобарный процесс 2–4, рис. 2.3). В этом случае соответствующая разность уровней  $h_0$ , обусловленная ординатой 4–5, окажется заниженной, что приведет к уменьшению значения  $\gamma$ .

Для получения правильного результата измерения клапан необходимо закрыть в тот момент, когда газ находится в состоянии 2, что не представляется возможным. Поэтому ординату 2–3, которая отвечает разности уровней  $h_0$ , приходится определять косвенным методом.

Рассмотрим с этой целью процесс адиабатного расширения при открытом клапане, с учетом теплообмена с окружающей средой во время протекания изобарного процесса 2–4.

Обратимся к рисунку 2.4. Пусть газ находится в состоянии 1. Нажатие клапана А приводит к адиабатному расширению (процесс 1–2). При этом температура газа понизится относительно комнатной температуры  $T_1$  до величины  $T_2$ , давление станет равно атмосферному  $P_2$ .

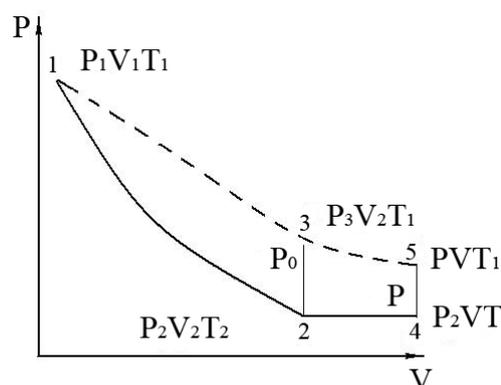


Рисунок 2.4 – График зависимости  $P$  от  $V$   
(определение  $h_0$  косвенным методом)

Если клапан оставить открытым на протяжении времени  $\tau$  после окончания процесса 1–2, то температура газа в баллоне повысится за счет теплообмена до величины  $T$  (изобарный процесс 2–4).

В точке 4 на графике закрывают клапан и оставляют баллон на некоторое время, пока температура внутри баллона не станет равной температуре окружающей среды  $T_1$  (изохорный процесс 4–5). При этом давление газа в баллоне повысится на величину  $\Delta P$ , определяемую по соответствующей разности уровней  $h$  жидкости  $U$ -образного манометра. Продолжительность адиабатного процесса 1–2 незначительна по сравнению со временем открытия клапана. Таким образом,  $\tau$  можно

рассматривать как продолжительность процесса выравнивания температуры воздуха в баллоне с окружающей средой (процесс 2–4).

С уменьшением времени  $\tau$  величина  $h(\Delta P)$ , как это видно из рисунков 2.4 и 2.5, возрастает и в предельном случае при  $\tau \rightarrow 0$  стремится к искомому значению  $h_0(\Delta P_0)$ .

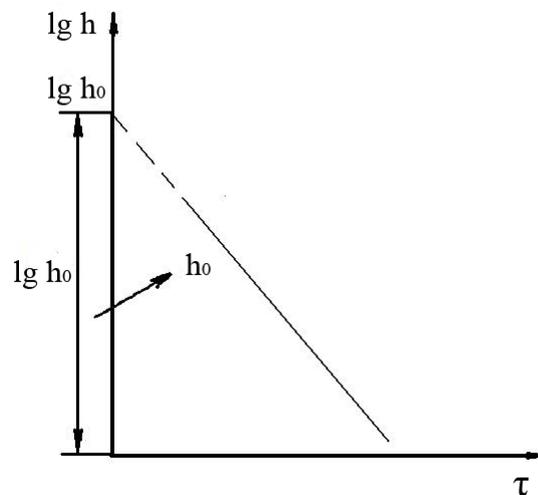


Рисунок 2.5 – График зависимости  $\lg h$  от  $\tau$  (определение  $h_0$  графическим способом)

Поэтому величину  $h_0$  можно определить графическим способом, измерив ряд значений  $h_i$ , которые отвечают разным значениям  $\tau_i$ .

Опыт подтверждает линейную зависимость между величиной  $\lg h$  и временем открытия клапана  $\tau$ , т.е.

$$\lg h = \lg h_0 - \beta\tau, \quad (2.9)$$

где  $\beta$  – угловой коэффициент прямой, который зависит от условий эксперимента.

Построив график (рисунок 2.5), на котором по оси абсцисс откладывается время открытия клапана  $\tau$ , а по оси ординат – величина  $\lg h$ , мы экстраполируем прямую, усредняя экспериментальные точки до значения  $\tau \approx 0$  и находим величину  $\lg h_0$ . Найденное значение  $h_0$

позволяет определить отношение теплоемкостей  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$  воздуха по формуле (2.8).

### Порядок выполнения работы

1. Накачать в баллон воздух так, чтобы разность уровней жидкости в манометре стала равной 25–30 см. Отсчет следует делать по нижнему краю мениска.

2. Быстрым нажатием открыть клапан А, соединить баллон с атмосферой и одновременно включить секундомер. Выдержать клапан открытым 5 с и быстро закрыть. При этом давление в баллоне станет равным атмосферному, а температура понизится. Подождать 3–4 мин, пока температура в баллоне не станет снова равной температуре окружающей среды (мениски в манометре перестают перемещаться), отсчитать показание манометра.

3. Повторить пункты 1 и 2, выдержав клапан открытым 10, 15, 20 и 25 с. При этом до открытия клапана А уровень в одном из колен манометра осторожно установить с помощью крана В (после выравнивания температур) на том же делении, которое было в первом опыте. Прodelать не менее 6 таких измерений и их результаты записать в таблицу 2.1.

**Внимание!** При накачке воздуха необходимо следить за тем, чтобы нижний уровень жидкости в манометре не снижался до колена трубки, потому что в этом случае вся жидкость будет выброшена из манометра давлением воздуха и прибор выйдет из строя.

Таблица 2.1 – Результаты измерений

№ п/п	Время открытия клапана $\tau_i$ , с	$H_{1.1}$ , мм	$H_{1.2}$ , мм	$H_{1cp}$ , мм	$\lg H_{1cp}$
1	5				
2	10				
3	15				
4	20				
5	25				

Количество опытов –  $n =$

Коэффициент Стьюдента –  $t_{\alpha,n} =$

Систематические ошибки:

времени –  $\Delta\tau =$

разность уровней –  $\Delta H_{11} = \Delta H_{12} = \Delta H_{13} =$   $\Delta h_0 =$

### Обработка результатов измерений

1. Построить график  $\lg h = f(\tau)$ . Отдельные экспериментальные точки, которые не укладываются на общую прямую, необходимо проверить путем повторных измерений (график строится на миллиметровой бумаге и обязательно прикрепляется к рабочему протоколу).

2. Графическим способом определить значение величины  $\lg h_0$ , которое соответствует  $\tau = 0$ , и найти значение  $h_0$ .

3. Найти экспериментальное значение коэффициента Пуассона по формуле (2.8)

$$\gamma = \frac{H_1}{H_1 - h_0}.$$

4. Рассчитать относительную ошибку измерения величины  $\gamma$  по формуле

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma} = \frac{\Delta h_0}{H_1 - h_0} + \frac{h_0 \Delta H_1}{H_1 (H_1 - h_0)}. \quad (2.10)$$

Величина  $\Delta h_0$ , так же, как и  $\Delta H_1$ , может быть принята равной 2 мм, но может быть найдена по разбросу точек на графике  $\lg h = f(\tau)$ .

*Примечание.* Выбор систематической ошибки  $\Delta h_0$  проводится по согласованию с преподавателем.

5. Рассчитать теоретическое значение коэффициента Пуассона для воздуха по формуле

$$\gamma = \frac{i + 2}{i}. \quad (2.11)$$

6. Окончательные результаты измерений и расчетов записать в виде

$$\gamma = \gamma \pm \Delta\gamma.$$

### Контрольные вопросы

1. Дайте определения теплоемкости тела, удельной теплоемкости, молярной теплоемкости.

2. Что такое  $C_p$  и  $C_v$  и как они определяются через число степеней свободы? Как связаны между собой величины  $C_p$  и  $C_v$ ? Какая из величин больше и почему?

3. Запишите уравнение Пуассона.

4. Сформулируйте первый закон термодинамики. Примените его для изопроцессов в идеальных газах.

5. Изобразите графически на диаграмме в координатах  $P, V$  процессы, последовательно осуществленные в этой работе.

6. Какой процесс называют адиабатным? За счет чего выполняется работа в этом процессе?

7. Дайте определение обратимого процесса. Почему процессы, осуществляемые в данной работе, необратимы?

### Лабораторная работа 3

#### Тема. Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса.

**Цель.** Ознакомиться с методом Стокса для определения вязкости жидкости.

**Приборы и материалы.** Стекланный цилиндрический сосуд, исследуемая жидкость, набор шариков, микрометр, линейка, термометр.

**Практическое значение.** При конструировании и расчетах любых транспортных средств (летательных аппаратов, морских и речных судов, автомобилей и т. д.), особенно предназначенных для движения на больших скоростях, самое важное значение имеет учет сил внутреннего трения в жидкой и газообразной средах. Кроме того, будущим инженерам всегда нужно знать, что смазка разными смазочными маслами трущихся поверхностей во всех машинах и механизмах позволяет заменить внешнее (сухое) трение значительно меньшим – внутренним трением смазочных масел, которое существенным образом удлиняет время промышленной эксплуатации машин.

#### Краткие теоретические сведения

Метод Стокса состоит в наблюдении за падением небольшого шарика в цилиндрическом сосуде (рисунок 3.1), заполненном исследуемой жидкостью (техническим вазелином, трансформаторным маслом и т. д.).

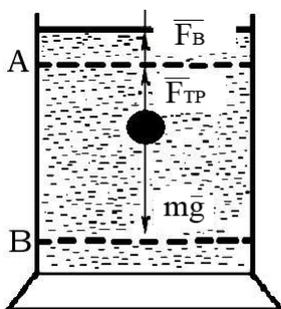


Рисунок 3.1 – Падение небольшого шарика в цилиндрический сосуд

На шарик действуют три силы:

а) сила веса:

$$mg = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_1 g, \quad (3.1)$$

где  $\rho_1$  – плотность вещества шарика;

б) сила, которая выталкивает тело из жидкости, определяется по закону Архимеда:

$$F_{\text{в}} = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_2 g, \quad (3.2)$$

где  $\rho_2$  – плотность исследуемой жидкости;

в) сила сопротивления, обусловленная силами внутреннего трения, определяется по закону Стокса:

$$F_{\text{тр}} = 6\pi\eta rV, \quad (3.3)$$

где  $\eta$  – коэффициент вязкости жидкости;

$r$  – радиус шарика;

$V$  – скорость шарика при падении.

2. Опущенный в жидкость шарик сначала падает ускоренно, но с увеличением скорости возрастает сила трения, в результате чего ускорение шарика уменьшается, и через некоторое время шарик приходит в движение с постоянной скоростью. Условием равномерного прямолинейного движения является равновесие действующих на тело сил, или  $\Sigma \vec{F}_k = 0$ . На основании второго закона Ньютона имеем

$$m(d\vec{V} / dt) = \Sigma \vec{F}_k, \quad (3.4)$$

где  $m = (4/3) \pi r^3 \cdot \rho_1$  – масса движущегося шарика;

$d\vec{V} / dt$  – ускорение шарика.

Спроектировав (3.4) на направление движения, с учетом (3.1), (3.2), (3.3), получим

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho_1 \frac{dV}{dt} = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_1 g - \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_2 \cdot g - 6\pi\eta rV. \quad (3.5)$$

Решая уравнение (3.5), найдем

$$V(t) = V_{\text{уст}} - [V_{\text{уст}} - V(0)] \cdot e^{-t/\tau}, \quad (3.6)$$

где  $V(t)$  – скорость шарика в момент времени  $t$ ;

$V(0)$  – скорость шарика в момент начала его движения в жидкости;

$V_{\text{уст}}$  – установившаяся скорость,

$$V_{\text{уст}} = \frac{2}{9} gr^2 \frac{(\rho_1 - \rho_2)}{\eta}, \quad (3.7)$$

где  $\tau$  – время релаксации

$$\tau = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2 \cdot \rho_1}{\eta}. \quad (3.8)$$

Как видно из (3.6), скорость шарика экспоненциально приближается к установленной скорости. Установленная скорость определяется величиной  $\tau$ , которая имеет размерность времени и называется временем

релаксации. Если время падения в несколько раз больше времени релаксации, то процесс установления скорости можно считать законченным.

Измерив на опыте установленную скорость падения шариков и величины  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $r$ , можно определить коэффициент внутреннего трения жидкости по формуле

$$\eta = \frac{2}{9} gr^2 \frac{\rho_1 - \rho_2}{V_{вст}}. \quad (3.9)$$

Если учесть влияние стенок сосуда, то рабочая формула для определения коэффициента вязкости  $\eta$  примет вид:

$$\eta = \frac{1}{18} gd^2 \cdot \frac{(\rho_1 - \rho_2)t}{(1 + 2,4(d/D))H}, \quad (3.10)$$

где  $d, D$  – диаметр шарика и внутренний диаметр сосуда, соответственно;

$H$  – расстояние, которое проходит шарик с установившейся скоростью (участок АВ на рисунке 3.1);

$t$  – время прохождения расстояния  $H$ .

Необходимо подчеркнуть, что формула (3.9) верна для шариков, которые движутся близ осевой линии сосуда.

При выводе формулы Стокса предполагалось, что обтекание шарика жидкостью имеет ламинарный характер. Как известно, характер обтекания определяется числом Рейнольдса

$$R_e = \frac{VD\rho_2}{2\eta}. \quad (3.11)$$

Обтекание является ламинарным лишь при не очень больших значениях  $R_e$  ( $R_e < 1000$ ). Поскольку из условий проведения опыта  $V(0) = 0$ , то путь релаксации  $S$ , после интегрирования (3.6), находится по формуле

$$S = H \frac{\tau}{t} e^{-1}. \quad (3.12)$$

Из формулы (3.12) легко найти, что  $S \ll H$  при  $t \gg \tau$ .

При движении потока жидкости (или газа) в общем случае скорость течения в разных местах потока разная.

Такое состояние жидкости не является равновесным. В ней благодаря тепловому движению молекул происходит передача импульса от более быстрых участков потока к менее быстрым. Эти процессы, которые

приводят к выравниванию скорости течения разных слоев жидкости, называются внутренним трением, или вязкостью.

Всякое изменение скорости может происходить лишь под действием силы. Между слоями движущейся жидкости, по касательной к слоям действует сила внутреннего трения  $F_{\text{тр}}$ . Эта сила является одной из фундаментальных сил (электромагнитные силы) и в конечном счете сводится к силам межмолекулярного взаимодействия, т.е. к силам взаимодействия движущихся заряженных частиц, из которых состоят молекулы. Как показывает опыт и расчеты,  $F_{\text{тр}}$  зависит от площади касательных слоев  $\Delta S$ , от скорости изменения величины  $\frac{\Delta V}{\Delta x}$ , от вида жидкости и условий внешней среды:

$$F_{\text{тр}} = -\eta \frac{\Delta V}{\Delta x} \Delta S, \quad (3.13)$$

где  $\frac{\Delta V}{\Delta x}$  – градиент скорости, показывающий изменение скорости на единицу расстояния в направлении, перпендикулярном к скорости;

$\eta$  – коэффициент внутреннего трения, или вязкости, численно равен силе вязкости, которая возникает между слоями жидкости при единичном градиенте скорости через единичную площадку.

Знак « $-$ » показывает, что сила вязкости направлена всегда против изменения скорости. В системе СИ  $\eta$  измеряется в  $\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$ ; в

СГС:  $\frac{\text{г}}{\text{см} \cdot \text{с}} = \text{пуаз}$ , причем  $1 \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}} = 10 \text{пз}$  (пуаз).

Коэффициент вязкости, определенный уравнением (3.7), называется динамической вязкостью, в отличие от кинематической вязкости, равной отношению  $\eta / \rho$ , где  $\rho$  – плотность жидкости.

Коэффициент кинематической вязкости в системе СИ измеряется: в  $\text{м}^2/\text{с}$ , а в СГС:  $\text{см}^2/\text{с} = \text{стокс}$ .

Коэффициент вязкости жидкости существенным образом зависит от температуры: с повышением температуры вязкость уменьшается, например, в глицерине, при увеличении температуры от  $20^\circ \text{C}$  до  $30^\circ \text{C}$  величина  $\eta$  уменьшается в 2, 5 раза.

При движении в жидкости (или газе) твердых тел в непосредственной близости к поверхности тела образуется тонкий слой жидкости, (промежуточный слой), в котором скорость меняется от нуля до скорости набегающего потока. Течение жидкости (газа) может быть ламинарным (слоистым), когда отдельные слои жидкости движутся с параллельно

направленными скоростями, не перемешиваясь, и турбулентным, при котором возникает энергичное перемешивание слоев.

Положение точки перехода ламинарного течения в турбулентное зависит от формы тела, шершавости его поверхности и от безразмерного числа Рейнольдса.

Число Рейнольдса служит также критерием подобия для течения жидкостей в трубах, каналах или при движении твердых тел в жидкой среде. Характер течения или обтекания будет одинаковым, если каждому течению отвечает то же самое значение  $R_e$ . Это позволяет при испытаниях в аэро- и гидродинамических трубах использовать вместо реальных транспортных средств их уменьшенные модели, при этом скорость продувки должна быть увеличена во столько раз, во сколько раз уменьшены поперечные размеры тел.

При движении тел с большими скоростями полное обтекание тела становится невозможным: поток жидкости отрывается от поверхности тела, в результате чего за телом возникают вихри, и давление за телом падает, то есть  $P_A > P_B$  (рисунок 3.2.).

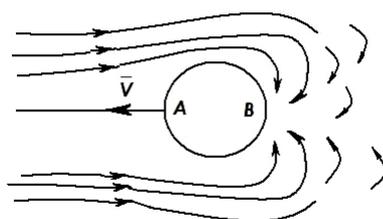


Рисунок 3.2 – Обтекание тела, которое движется с большой скоростью

Таким образом, лобовое сопротивление, которое испытывает тело, состоит из сопротивления сил трения и сопротивления давления. Наименьшее сопротивление силе давления испытывают тела хорошо обтекаемой каплевидной формы. Такую форму хотят придать фюзеляжу и крыльям самолета, кузову автомобиля и др. Соотношение между этими двумя видами сопротивлений определяется значением числа Рейнольдса: при малых  $R_e$  основную роль играет сопротивление трения, так что сопротивлением давления можно пренебречь, при больших значениях  $R_e$  в лобовом сопротивлении преобладают силы давления.

### Порядок выполнения работы

1. С помощью линейки измерить расстояние  $l$  между метками А и В на сосуде (рисунок 3.1).

2. С помощью ареометра определить плотность жидкости  $\rho_2$  или (если жидкость известного сорта) найти ее плотность из таблицы

справочника. Надо выяснить у преподавателя, из какого материала изготовлены шарики и из таблицы IX [5] определить их плотность.

3. Измерить время  $t$  прохождения шариком расстояния АВ. Для этого опустить шарик через воронку в сосуд и в момент прохождения им отметки А включить секундомер; при прохождении через отметку В остановить секундомер.

4. Используя микрометр (или отсчетный микроскоп), измерить диаметр шарика.

5. Повторить измерения пунктов 4 и 5 для пяти разных шариков.

6. Измерить внутренний диаметр цилиндрического сосуда.

7. Данные эксперимента занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты измерений

№ п / п	d, м	t, с	l, м	D, м
1				
2				
3				
4				
5				
ср. знач.				

Плотность вещества шарика –  $\rho_1 =$  кг / м<sup>3</sup>

Плотность исследуемой жидкости –  $\rho_2 =$  кг / м<sup>3</sup>

Систематические погрешности:

линейки м, микрометра м,

штангенциркуля м, времени с.

### Обработка результатов измерений

1. Статистическую обработку результатов измерений провести согласно существующим правилам.

2. Окончательный результат представить в виде:

$$\eta = (\eta_{\text{ср}} \pm \Delta\eta), \text{ кг (м} \cdot \text{с)}^{-1},$$

где

$$\Delta\eta = \sqrt{(\Delta\eta_{(\text{пр})})^2 + (\Delta\eta_{(\text{сл})})^2}.$$

3. По данным одного из измерений (каждого) рассчитать по формуле (3.11) число Рейнольдса и сделать вывод о характере течения, которое сопровождает движение шарика, и о соотношении между силами трения и давления.

### Контрольные вопросы

1. В чем суть метода Стокса для измерения коэффициента вязкости?
2. Влияет ли материал шарика на силу трения, коэффициент вязкости?
3. При измерении какой величины допускается основная ошибка опыта? Почему?
4. Какие причины возникновения и природа сил внутреннего трения?
5. Дайте определение коэффициента внутреннего трения (вязкости).
6. Какие силы действуют на шарик, который падает в цилиндрическом сосуде? Приведите формулы сил.
7. Объясните, какие из этих сил меняются со временем и почему?
8. Объясните, как движется шарик в цилиндрическом сосуде?
9. Чем объяснить увеличение коэффициента вязкости жидкости при снижении температуры? Почему зимой нужно прогревать двигатель автомобиля перед движением?
10. Как изменится вязкость газа при его нагревании и почему?
11. Зачем вводится число Рейнольдса? Объясните содержание символов, которые входят в число Рейнольдса.
12. Объясните содержание терминов: ламинарное течение и турбулентное течение.

### Лабораторная работа 4

**Тема. Изучение на механической модели распределения молекул газа по компонентам скоростей.**

**Цель.** Показать на математической модели, что распределение большого количества молекул по компонентам скоростей подлжит статистическим законам.

**Приборы и материалы.** Доска Гальтона, воронка, шарики, линейка.

**Практическое значение.** Исследуемые процессы связаны с наиболее распространенным в природе законом распределения случайных величин – законом нормального распределения Гаусса, которому подчиняются случайные явления, встречающиеся в природе, жизни и технике.

#### Краткие теоретические сведения

Случайные явления встречаются довольно часто. Предсказать отдельные случайные явления нельзя, потому что на них сказывается влияние очень большого числа факторов. Например, при стрельбе по мишени, во время измерения физических величин, при движении молекул, в азартных играх и т. д., в той или другой степени наблюдаются элементы случайности. При этом никакое единичное явление не характеризует общей картины случайных явлений. Следующий пример: по одному

случайному отверстию в мишени нельзя судить о меткости стрелка, в то время как большое количество выстрелов дает понятие о точности стрельбы. Большая совокупность случайных явлений или величин подлжит статистическим законам, которые позволяют найти вероятность, с которой осуществляется то или другое событие в серии случайных однотипных событий.

Закон нормального распределения (закон Гаусса) дает зависимость вероятности появления данной величины от значения самой величины. Это распределение имеет место в том случае, если случайная величина зависит от большого количества факторов, которые вносят с равной вероятностью положительные и отрицательные отклонения.

Согласно закону Гаусса количество измерений  $\Delta N$ , которые дали отклонение от среднего значения измеренной величины в пределах от  $x$  до  $x + \Delta x$ , пропорционально интервалу  $\Delta x$  и полному количеству измерений  $N$  называется законом распределения или плотностью вероятности.

$$y = \frac{\Delta N}{N \Delta x} = f(x) \quad (4.1)$$

Кривая  $y = f(x)$  называется кривой Гаусса или кривой нормального распределения ошибок (рисунок 4.1.).

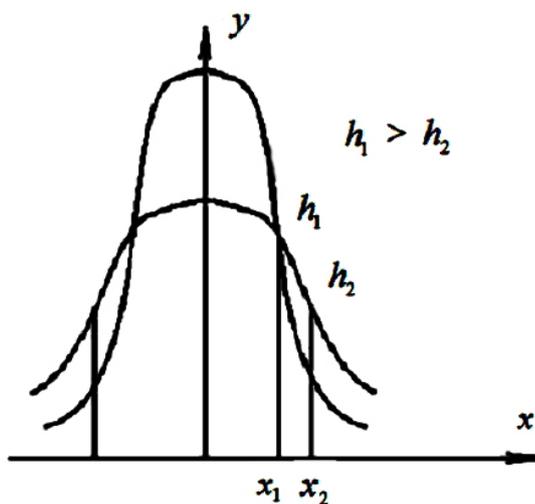


Рисунок 4.1 – Кривые Гаусса

Закон Гаусса имеет вид

$$y = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 x^2}, \quad (4.2)$$

где  $x$  – отклонение измеренной величины от ее среднего значения;  
 $y$  – плотность вероятности появления ошибки величины  $x$ .

Кривая Гаусса пронормирована так, что

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1. \quad (4.3)$$

Величина  $h$  называется мерой точности и определяется из соотношения

$$y(x_0) = y(1/h) = \frac{1}{e} y_{\max}. \quad (4.4)$$

Чем больше мера точности  $h$ , тем меньше рассеяние результатов измерений относительно их среднего значения и соответственно больше точность измерений. Другие характеристики рассеяния – средняя арифметическая ошибка  $\bar{x}$  и средняя квадратичная ошибка  $\sigma$  связаны с мерой точности  $h$  соотношениями:

$$\bar{x} = \frac{1}{\sqrt{\pi h}}, \quad (4.5)$$

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2h}}. \quad (4.6)$$

Распределение молекул по компонентам скорости подлeжит следующему закону:

$$f(V_x) = A e^{-\frac{mV_x^2}{2kT}}, \quad (4.7)$$

где

$$A = \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{1/2}. \quad (4.8)$$

Сравнивая формулы (4.7) с (4.2), видим, что они адекватны. Таким образом, распределение молекул газа по компонентам скорости подлeжит закону распределения случайных величин Гаусса.

### Описание оборудования

Изучение закона распределения молекул по компонентам скорости проводится на механической модели, которая воссоздает картину случайных отклонений от среднего положения частиц в результате суммирования большого количества равновероятных элементарных ошибок. В этой работе используется прибор (доска Гальтона), в которой вертикально падающая струя шариков (механический аналог молекул газа) рассеивается в вертикальной плоскости (рисунок 4.2). При столкновении шариков с рассеивателями происходит элементарное отклонение с равной вероятностью вправо и влево.

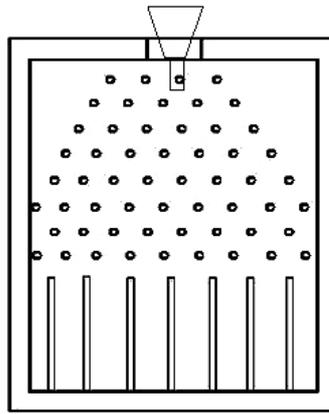


Рисунок 4.2 – Общий вид доски Гальтона

Рассеянные шарики, собираясь в ящике с узкими сердцевинами, дают представление о характере распределения случайных отклонений от вертикали. Если преимущество левых или правых отклонений от среднего направления падения шариков отсутствует, то одномерное рассеяние происходит по закону Гаусса. Аналогичная картина наблюдается и при изучении распределения молекул газа по составляющим скоростей. Случайные столкновения молекул при хаотичном движении в газе приводят к случайным изменениям их скоростей как по величине, так и по направлению.

Если рассматривать распределение молекул по скоростям вдоль какого-нибудь одного направления, то большое количество случайных столкновений приводит к закону нормального распределения вдоль это направления.

### Порядок выполнения работы

1. Взять доску Гальтона с меньшим количеством рассеивателей (малое количество элементарных ячеек). В отверстие доски вставить воронку, причем центральный рассеиватель должен находиться под щелью воронки.

Через воронку сыпать шарики до тех пор, пока центральные сердцевинки не заполнятся почти полностью. Измерить уровень шариков в каждой ячейке. Результаты измерений нанести на график распределения шариков по ячейкам.

$$y_i = f(x_i). \quad (4.9)$$

Очевидно, что уровень шариков  $y$  в  $i$ -ой ячейке пропорционален количеству шариков, которые попали в эту ячейку. Величиной отклонения  $x_i$  является расстояние  $i$ -ой ячейки от средней, лежащей непосредственно под щелью, а интервал между ячейками  $\Delta x$  принимается за единицу.

2. Отсчитать небольшое количество шариков (20–30). Высыпать их через воронку. Распределение шариков по ячейкам в этом случае измерить не по уровню, а по числу шариков в каждой ячейке. Результаты измерений нанести на аналогичный предыдущий график

$$y_i = f(x_i)$$

3. Взять другую доску Гальтона с большим количеством рассеивателей. Прodelать то же, что и в п. 1, 2.

4. Результаты измерений и вычислений свести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты измерений

x	x <sup>2</sup>	y	yx <sup>2</sup>

### Обработка результатов измерений

1. Для серии экспериментальных данных, сведенных в таблицу, определить меру точности по формуле

$$h = \sqrt{\frac{\sum y_i}{2 \sum (y_i x_i^2)}}. \quad (4.10)$$

2. Построить по точкам теоретическую кривую с данной мерой точности h

$$y = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 x^2}. \quad (4.11)$$

3. Сделать проверку совпадения экспериментального распределения  $y_i = f(x_i)$  с вычислением по формуле (4.11).

4. Пункты 1–3 выполнить для обеих досок Гальтона.

5. Рассчитать по формулам (4.5) и (4.6) среднюю арифметическую  $\bar{x}$  и среднюю квадратичную  $\sigma$  ошибки.

### Контрольные вопросы и задачи

1. Представьте вид кривой распределения.

2. Укажите на кривой распределения наиболее возможную, среднюю квадратичную и среднюю арифметическую скорости.

3. Как меняется вид кривой распределения молекул одномерного газа по компонентам скорости с ростом температуры и почему?

4. Пользуясь законом распределения молекул одномерного идеального газа по скоростям, получите выражение для наиболее возможной скорости.

5. Пользуясь графиком распределения  $f(V_x)$  определите вероятность того, что скорость молекулы находится в интервале скоростей от  $V_x$  до  $V_x + dV_x$ .

6. Решите задачи № 5.93, 5.94, 5.97 [5].

## Лабораторная работа 5

**Тема. Исследование зависимости коэффициента поверхностного натяжения жидкости от их концентрации и температуры методом Ребиндера.**

**Цель.** Исследовать зависимость коэффициента поверхностного натяжения жидкости от температуры и от концентрации методом измерения избыточного давления в пузырьках.

**Приборы и материалы.** Установка для этой работы, дистиллированная вода, набор пробирок с раствором глицерина разной концентрации, термометр, термостат, электроплита.

**Практическое значение.** Ознакомление с одним из наиболее распространенных методов определения коэффициента поверхностного натяжения  $\alpha$ , который является основной величиной, характеризующей свойства поверхности жидкости.

### Описание оборудования

Метод Ребиндера состоит в измерении давления, необходимого для создания пузырьков. Установка, используемая в работе (рисунок 5.1), состоит из наполненного водой аспиратора, соединенного резиновыми и стеклянными трубками с манометром и воздушным промежутком закрытого стеклянного сосуда, в нижней части которой налита исследуемая жидкость. Через отверстие в резиновой пробке, которой закрыт сосуд, проходит трубка с капиллярным наконечником. Во время исследования капиллярный наконечник погружают в жидкость так, чтобы он немного касался ее поверхности.

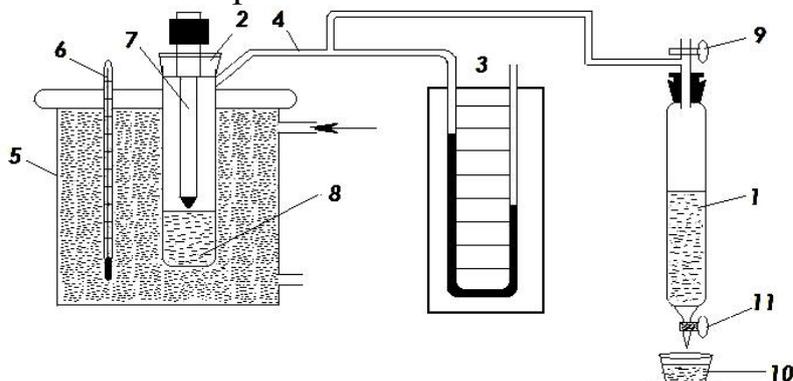


Рисунок 5.1 – Общий вид установки для метода Ребиндера

Сосуд, для поддержания и изменения температуры помещается в стакан с водой, которая выполняет роль термостата. Вода в стакане и жидкость в сосуде нагреваются на электроплите, которая включена в сеть через ЛАТР. Температура в стакане с водой измеряется термометром, причем вода в стакане постоянно перемешивается мешалкой.

Когда из аспиратора 1 при закрытом отростке начнет медленно вытекать вода, то это означает, что в верхней части сосуда 2 и в левом колене манометра давление уменьшается. При определенном разрежении  $P$ , вследствие действия атмосферного давления  $P_0$ , через капилляр в жидкость продавливаются пузырьки воздуха (разность давлений  $\Delta P$  измеряется манометром). Это происходит тогда, когда разность давлений  $\Delta P$  уравнивается давлением, обусловленным силами поверхностного натяжения исследуемой жидкости, которые стараются сжать этот пузырек. Поэтому в момент отрыва пузырька

$$\alpha = A \cdot h, \quad (5.1)$$

где  $h$  – разность высот жидкости в коленах манометра;

$A$  – постоянная прибора, который зависит от размеров капиллярного наконечника.

Для ее определения необходимо провести опыты с жидкостью, коэффициент поверхностного натяжения  $\alpha$  которой известен. Пусть при этом  $\alpha = \alpha_0$ ,  $h = h_0$ , тогда

$$A = \frac{\alpha_0}{h_0}. \quad (5.2)$$

### Краткие теоретические сведения

Молекулы на поверхности жидкости находятся в особых условиях по сравнению с другими молекулами жидкости. Внутри объема жидкости каждая молекула испытывает притяжение со стороны всех соседних с ней молекул, которые находятся в пределах сферы молекулярного действия, центр которой совпадает с центром молекулы.

Радиус молекулярного действия  $r$  имеет величину порядка нескольких эффективных диаметров молекулы. Равнодействующая всех сил притяжения для молекулы  $M_1$ , которая находится внутри жидкости на расстоянии  $r$ , в среднем равна нулю (рисунок 5.2).

Молекулы пограничного слоя  $M_2$  и  $M_3$ , в отличие от молекул на глубине, окружены соседними молекулами жидкости не со всех сторон. Часть «соседей» на поверхности – это частицы приграничной среды, которая может отличаться от жидкости как природой частиц, так и их плотностью, поэтому силы притяжения, которые действуют на каждую молекулу жидкости в поверхностном слое, окажутся неуравновешенными.

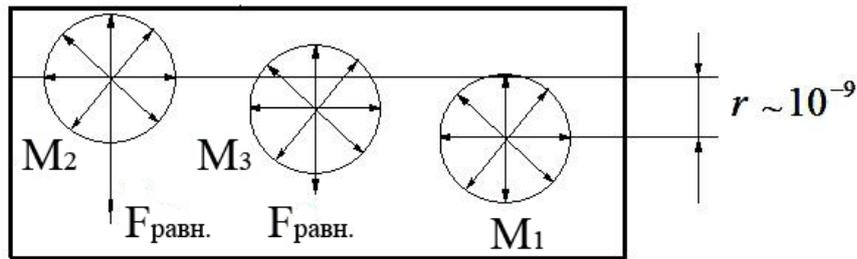


Рисунок 5.2 – Равнодействующая всех сил притяжения для молекул  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$

Например, поскольку плотность молекул в жидкости больше, чем в насыщенном паре, сила притяжения, которую испытывает молекула поверхностного слоя со стороны молекул жидкости больше, чем со стороны молекул пара. Поэтому равнодействующая всех сил притяжения, которые действуют на поверхностную молекулу, отлична от нуля и направлена внутрь жидкости. Таким образом, переход молекулы из глубины жидкости в поверхностный слой связан с необходимостью осуществления работы против этой равнодействующей силы, т.е. требует затраты энергии.

Работа по изменению (при постоянной температуре) поверхности жидкости на величину  $\Delta S$  определяется выражением

$$\Delta A = -\alpha \Delta S. \quad (5.3)$$

Коэффициент  $\alpha$  называется коэффициентом поверхностного натяжения ( $\alpha > 0$ ). Таким образом,  $\alpha$  численно равно работе изотермического образования единицы площади поверхности жидкости на границе с другой средой. В системе СИ  $\alpha$  измеряется в Дж / м<sup>2</sup>.

Поскольку работа  $\Delta A$ , которая необходима для изотермического увеличения поверхностного слоя жидкости, идет на увеличение потенциальной энергии молекул, которые переходят на поверхность, молекулы в поверхностном слое жидкости обладают избыточной потенциальной энергией по сравнению с молекулами внутри объема жидкости.

Изменение площади поверхности на величину  $\Delta S$  вызывает изменение потенциальной энергии молекул поверхностного слоя на величину

$$\Delta U = \alpha \Delta S. \quad (5.4)$$

С другой стороны, если изменение поверхности жидкости на величину  $\Delta S$  осуществить изотермически и назад, то необходимая для этого работа должна быть равна изменению свободной энергии поверхности  $E$ , т.е.

$$\Delta A = -\Delta E. \quad (5.5)$$

Таким образом, избыточная потенциальная энергия молекул в поверхностном слое жидкости является свободной энергией поверхностного слоя, т.е.  $\alpha$  можно определить как свободную энергию единицы площади этой поверхности:

$$\alpha = \frac{\Delta E}{\Delta S}. \quad (5.6)$$

Коэффициент поверхностного натяжения  $\alpha$  зависит от химического состава жидкости и от ее температуры. С увеличением температуры  $\alpha$  уменьшается и принимает значение нуль при критической температуре  $T_k$ , потому что при этой температуре исчезает различие между жидкостью и ее паром, а значит, исчезает и поверхность, которая разделяет обе фазы. Приближенно для температур, далеких от  $T_k$ , зависимость  $\alpha$  от температуры имеет вид

$$\alpha(T) = \alpha_0(1 - aT), \quad (5.7)$$

где  $\alpha_0$  –  $\alpha$  при температуре  $T_0$  (например, при комнатной);

$a$  – температурный коэффициент поверхностного натяжения.

Примеси сильно влияют на величину поверхностного натяжения. Например, растворение в воде мыла уменьшает ее коэффициент поверхностного натяжения почти в два раза. Растворение в воде NaCl, наоборот, приводит к увеличению  $\alpha$ .

Все вышесказанное об особых условиях, в которых находятся молекулы поверхностного слоя, также относится и к твердым телам. Таким образом, твердые тела, как и жидкости, имеют поверхностное натяжение.

### Порядок выполнения работы

**Задание 1.** *Исследовать зависимость  $\alpha$  от температуры.*

1. В пробирку 2 (рисунок 5.1) налить дистиллированную воду, установить капилляр 7 так, чтобы он чуточку касался отверстием поверхности воды.

2. Кран 9 открыть и держать до тех пор открытым, пока жидкость в коленах манометра не установится на одном уровне. Потом закрыть кран.

3. Открыть кран 11 так, чтобы вода вытекала каплями из аспиратора.

4. В тот момент, когда в пробирке 2 проскочит пузырек воздуха, отметить разность давлений  $h$  по манометру и записать полученный результат. Сделать отсчеты  $h$  по манометру не менее, чем для 10 пузырьков.

5. Взять из таблицы VIII [5]  $\alpha_0$  для воды при данной температуре и определить постоянную прибора  $A$  по формуле (5.2).

6. Заменяя в пробирке 2 воду исследуемой жидкостью, провести аналогичные измерения и определить  $\alpha$  при разных температурах по формуле (5.1).

7. Результаты занести в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 – Результаты измерений

№ п / п	Температура	$h_1, \text{см}$	$h_2, \text{см}$	$h_3, \text{см}$	$\bar{h}, \text{см}$	$\alpha, \text{Дин / см}$
1	Комнатная					
2	$T_2 =$					
3	$T_3 =$					
4	$T_4 =$					
5	$T_5 =$					

**Задание 2.** Исследовать зависимость  $\alpha$  от концентрации

1. Приготовить растворы разной концентрации: 5, 10, 20, 30 %... (для приготовления, например, 10 %-го раствора необходимо в 90 г воды растворить 10 г вещества).

2. Прodelать с указанными растворами то же, что указано в п. 2, 3, 4 задачи 1.

3. По формуле (5.1) определить  $\alpha$  для растворов разной концентрации.

4. Результаты расчетов занести в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты расчетов

№ п / п	Концентрация С %	$h_1, \text{см}$	$h_2, \text{см}$	$h_3, \text{см}$	$\bar{h}, \text{см}$	$\alpha, \text{Дин / см}$
1	вода					
2	10					
3	20					
4	40					
5	60					
6	80					
7	100					

**Обработка результатов экспериментов**

1. По формуле (5.2) определить постоянную прибора.  
 2. По формуле (5.1) определить  $\alpha$  при разных температурах.  
 3. Построить график зависимости  $\alpha$  от температуры  $\alpha = f(T)$  и сделать вывод.

4. По формуле (5.1) определить  $\alpha$  при разных концентрациях.

5. Построить график зависимости  $\alpha$  от концентрации  $\alpha = f(C)$  и сделать выводы.

### Контрольные вопросы

1. В чем состоит метод определения коэффициента поверхностного натяжения по измерению избыточного давления в воздушных пузырьках?
2. Как определяется коэффициент поверхностного натяжения?
3. Как  $\alpha$  зависит от температуры и концентрации?
4. Когда и почему  $\alpha$  принимает значение нуль?
6. Как объяснить, что с увеличением температуры коэффициент поверхностного натяжения уменьшается?
7. Почему капли жидкости малого объема принимают сферическую форму?
8. Изменится ли  $\alpha$  для жидкости, если ее поверхность будет граничить не с воздухом, а с другой жидкостью?
9. Почему вода поднимается по стенкам капилляра, которые она смачивает?

### Лабораторная работа 6

**Тема.** Определение средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул воздуха.

**Цель.** Изучить основные законы гидроаэродинамики (в частности формулу Пуазейля) и концепцию идеального газа, явление переноса в нем и связь между коэффициентами переноса. Определить среднюю длину свободного пробега  $\langle \lambda \rangle$  и эффективный диаметр  $d$  молекул воздуха.

**Приборы и материалы.** Установка для определения средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул воздуха, секундомер, термометр, барометр.

**Практическое значение.** Основные понятия молекулярно-кинетической теории газов и жидкостей являются теоретическим фундаментом для изучения разных технических вопросов, а именно: расчета гидро - и аэродинамического сопротивления разных машин и механизмов (поливные и разбрызгивающие механизмы, карбюраторы в двигателях, аэродинамические свойства сельскохозяйственных машин, вакуумные установки и т. д.). Кроме этого, изучение термодинамики невозможно без знания молекулярно-кинетической теории.

### Краткие теоретические сведения

Идеальный газ описывается уравнением Менделеева – Клапейрона

$$pV = \frac{m}{\mu} RT, \quad (6.1)$$

связывающим параметры газа – давление  $p$ , объем  $V$  и температуру  $T$ . Если учесть, что масса газа  $m$  равна произведению числа молекул  $N$  в данном объеме  $V$  на массу одной молекулы  $m_0$ ,

$$m = N \cdot m_0, \quad (6.2)$$

а масса одного моля

$$\mu = N_A \cdot m_0, \quad (6.3)$$

где  $N_A$  – число Авогадро; то уравнение (6.1) принимает вид:

$$pV = \frac{m_0 N}{m_0 N_A} RT, \quad p = \frac{N}{V} \frac{R}{N_A} T = nkT, \quad (6.4)$$

где  $n = \frac{N}{V}$  – количество молекул в единице объема;

$\frac{R}{N_A}$  – постоянная Больцмана ( $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж / К).

Эти уравнения, однако, не содержат физические величины, которые характеризуют свойства молекул, микропараметры газа (массу молекулы  $m_0$ , среднюю квадратичную скорость  $\bar{u}$  или кинетическую энергию молекулы  $E$ ). В молекулярно-кинетической теории газа выводится уравнение – основное уравнение молекулярно-кинетической теории, которое связывает микро- и макропараметры газа:

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m_0 \bar{u}^2}{2} = \frac{2}{3} nE, \quad (6.5)$$

где  $E$  – средняя кинетическая энергия молекулы. Если сравнить (6.5) и (6.4), то получим  $\frac{2}{3} nE = nkT$ , или

$$E = \frac{3}{2} kT. \quad (6.6)$$

Эта формула справедлива для одноатомной молекулы с тремя степенями свободы, а в общем случае  $E = \frac{i}{2} kT$ , где  $i$  – количество степеней свободы молекулы. Из (6.6) можно определить среднюю квадратичную скорость молекулы

$$\frac{m_0 \bar{u}^2}{2} = \frac{3}{2} kT,$$

откуда

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}. \quad (6.7)$$

Важными микропараметрами газа является эффективный диаметр молекул  $d$  и средняя длина свободного пробега  $\langle \lambda \rangle$  – расстояние, которое пролетает молекула, двигаясь прямолинейно между последовательными столкновениями. Последняя величина может быть найдена как среднее арифметическое из расстояний между соседними столкновениями  $\lambda_{ik}$  (рисунок 6.1).

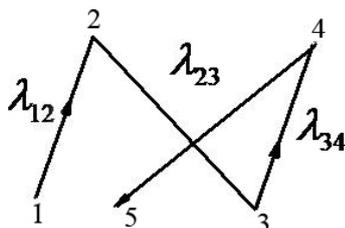


Рисунок 6.1 – Схема столкновений молекул

Если за одну секунду молекула испытает  $z$  столкновений, то

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\lambda_{12} + \lambda_{23} + \lambda_{34} + \dots + \lambda_{ik}}{z},$$

а пройденный при этом путь  $S = \bar{u}t = \bar{u}1 = \bar{u}$ , тогда

$$\langle \lambda \rangle = \frac{S}{z} = \frac{\bar{u}}{z}. \quad (6.8)$$

Число столкновений  $z$  за секунду равно количеству молекул, которые попали внутрь ломанной трубки радиусом, равным диаметру молекул  $d$ , причем заломы ее отвечают точкам столкновений молекул (рисунок 6.2). Площадь сечения этой трубки  $\pi d^2$ , а длина ее при  $t=1$  с равна  $\bar{u}$ . Тогда ее объем, созданный за 1 с, будет  $\pi d^2 \bar{u}$ , а количество молекул, которые попали внутрь и испытали столкновения с нашей рассмотренной центральной молекулой, равно  $z = n\pi d^2 \bar{u}$ . Однако с учетом движения всех молекул это число увеличивается в среднем в  $\sqrt{2}$  раз и действительно значение

$$z = \sqrt{2}n\pi d^2 \bar{u}. \quad (6.9)$$

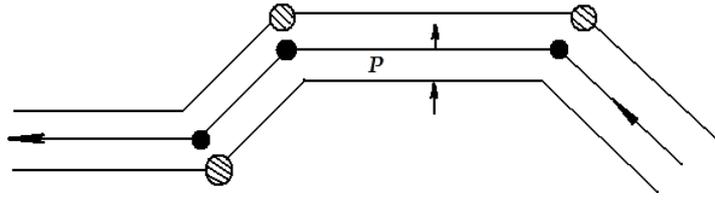


Рисунок 6.2 – Схема для расчетов числа столкновений  $z$  молекул за секунду

Подставив (6.9) в (6.8), получим

$$\langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n}, \quad (6.10)$$

а используя (6.4),

$$\langle \lambda \rangle = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p}, \quad (6.11)$$

т.е.  $\langle \lambda \rangle \sim \frac{1}{p}$ . Таким образом, с уменьшением давления  $p$  средняя длина свободного пробега увеличивается и при некотором давлении  $p$  для данного газа  $\langle \lambda \rangle$  станет сопоставимой с размерами  $l$  сосуда, в котором находится газ, т.е.  $\langle \lambda \rangle \sim l$ .

В этом случае молекула может пролететь от одной стенки сосуда до другой без столкновения с другими молекулами; такое состояние газа в физике называют состоянием среднего вакуума. Например, при давлении  $p = 1,5 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст. и размерах сосуда  $l \approx 1$  м будем иметь средний вакуум. Если  $\langle \lambda \rangle \gg l$ , то говорят о высоком вакууме, а при  $\langle \lambda \rangle < l$  – о низком.

Из формулы (6.11), зная  $d$  и  $p$ , можно определить  $\langle \lambda \rangle$ , однако определение опытным путем  $d$  представляет известные трудности. В данной работе определяем  $\langle \lambda \rangle$  из формулы связи между коэффициентом вязкости  $\eta$ , плотностью газа  $\rho$ ,  $\langle \lambda \rangle$  и  $\bar{u}$ .

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle \lambda \rangle \bar{u}. \quad (6.12)$$

Это уравнение получается при рассмотрении обмена количеством движения между слоями движущегося газа. Из (6.1) получим, что  $\rho = \frac{\mu}{RT} p$  и окончательно, используя (6.7) и (6.12), находим

$$\eta = \frac{1}{3} \frac{\mu p}{RT} \langle \lambda \rangle \sqrt{3RT/\mu}. \quad (6.13)$$

Из формулы Пуазейля для объема  $V$  газа, который вытекает из трубки длиной  $z$  и радиусом  $r$  за время  $\tau$  под действием разности давлений на концах трубки  $\Delta p$ , можно выразить

$$\eta = \frac{\pi r^4}{8Vz} \Delta p \tau. \quad (6.14)$$

Сравнивая (6.14) и (6.13), получим

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\pi r^4}{8pz} \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} \frac{\Delta p \tau}{V} = k \frac{\Delta p \tau}{V}, \quad (6.15)$$

где

$$k = \frac{\pi r^4}{8pz} \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} \quad (6.16)$$

в наших исследованиях является постоянной величиной.

Используя установку (рисунок 6.3), можно определить время течения некоторого объема жидкости  $V$  в стакан  $C$ , который равен объему воздуха, зашедшего через трубку  $T_p$  радиусом  $r$  и длиной  $z$  в баллон  $B$ .

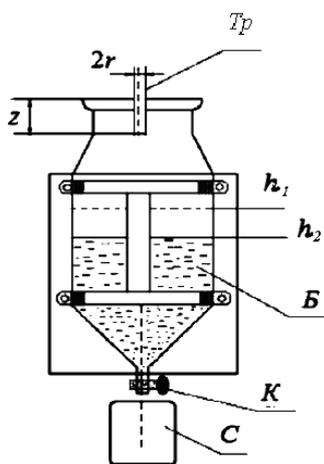


Рисунок 6.3 – Схема установки для определения средней длины свободного пробега

Разность давлений вне и внутри баллона  $\Delta p$  найдем как среднее арифметическое между уровнем воды  $C$ , и уровнем  $h_2$  в момент остановки секундомера, т.е.:

$$\Delta p = \rho_{\text{ж}} g \frac{h_1 + h_2}{2}. \quad (6.17)$$

При этом в стакане С будет находиться  $V_i$  ( $\text{м}^3$ ) воды (отметим, что наполнять С надо с момента, когда вода вытекает из Б каплями).

Таким образом, рассчитав  $k$  и  $\langle \lambda \rangle$  экспериментально, можно найти из (6.10) эффективный диаметр молекул газа, учитывая, что

$$p = nkT; \quad p_0 = n_0 kT; \quad n = n_0 \frac{pT_0}{p_0 T},$$

где  $n_0 = 2,69 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$  – число Лошмидта

$$d = \sqrt{\frac{1}{\pi \langle \lambda \rangle n \sqrt{2}}} = \sqrt{\frac{p_0 T}{\pi \langle \lambda \rangle n_0 p T_0 \sqrt{2}}}. \quad (6.18)$$

Таким образом, используя данные эксперимента и формулы (6.16), (6.17) и (6.18), находим  $\langle \lambda \rangle$  и  $d$ .

### Порядок выполнения работы

1. Наполнить баллон Б водой на 3/4 и зафиксировать уровень воды в нем  $h'$  ( $h' > h_1 = 50$  см).

2. Открыть кран К и, подождав, когда вода будет вытекать из Б каплями, а уровень жидкости сравняется с меткой  $h_1 = 0,5$  м, включить секундомер. С помощью секундомера измерить время  $\tau_1$  по истечении которого уровень воды в Б опустится к метке  $h_1' = 0,4$  м (что отвечает  $V_1 = 20$  мл), потом последовательно к  $h_2 = 0,3$  м ( $V_2 = 40$  мл),  $h_3 = 0,2$  м ( $V_3 = 60$  мл). Данные занести в таблицу 6.1. Очевидно, что объемы воды отвечают объемам воздуха, который зашел в баллон Б.

3. Зная  $h_1$  и  $h_i$ , определить разность давлений

$$\Delta p_i = \rho g \frac{h_1 + h_i}{2},$$

где  $\rho$  – плотность воды при температуре опыта.

4. По формуле

$$k = \frac{\pi r^4}{8\rho z} \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}$$

определить величину  $k$  и найти значение  $\langle \lambda \rangle$  по формуле  $\langle \lambda \rangle = k \frac{\Delta p \tau}{V}$  для каждого  $h_i$  отдельно.

5. Исследование повторить 3 раза, найти статистическое математическое ожидание

$$D^*(\langle \lambda \rangle), \quad \sigma^*(\langle \lambda \rangle),$$

для разных  $\langle \lambda \rangle$  и доверительный интервал  $\langle \lambda \rangle \pm \Delta \langle \lambda \rangle$ . Расчеты делать как для случая прямых измерений (роль случайных факторов очень значительна).

6. Определить эффективный диаметр молекул воздуха по формуле

$$d = \sqrt{\frac{p_0 T}{\sqrt{2} \pi n_0 p T_0 \langle \lambda \rangle}}.$$

Значение  $p$  и  $T$  определить с помощью барометра и термометра, который находится в лаборатории. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты измерений

№ п/п	h, м	h <sub>1</sub> , м	г, м	z, м	p, $\frac{H}{M^2}$	T, К	V <sub>i</sub> , м <sup>3</sup>	$\rho$ , $\frac{кг}{M^3}$	T <sub>0</sub> , К	p <sub>0</sub> , $\frac{H}{M^2}$	$\tau$ , с
1											
2											
3											

### Контрольные вопросы и задачи

1. Дайте определение идеальному газу, Запишите уравнение его состояния.

2. Какие явления переноса Вы знаете? Запишите уравнения, которые их описывают.

3. Какая связь между коэффициентами переноса?

4. Получите расчетную формулу для определения средней длины свободного пробега  $\langle \lambda \rangle$  молекул воздуха в данной работе.

5. Как связана  $\langle \lambda \rangle$  с эффективным диаметром молекулы?

6. Что такое средний вакуум и от чего зависит это состояние?

7. Как определяется разность давлений  $\Delta P$  в данной работе?

8. Какова температура и средняя скорость молекул кислорода, если при плотности  $\rho = 1,4 \text{ кг/м}^3$  коэффициент вязкости  $\eta = 2 \cdot 10^{-4}$  пуаз, и длина свободного пробега молекул  $\langle \lambda \rangle = 10^{-7}$  г.

9. Чему равняется эффективный диаметр молекул  $d$  и среднее количество столкновений в секунду для данного газа (см. п. 8)?

## Лабораторная работа 7

**Тема. Определение влажности воздуха аспирационным психрометром с электромотором М-34.**

**Цель.** Разобрать принцип действия аспирационного психрометра с электромотором М - 34. Научиться определять влажность воздуха.

**Приборы и материалы.** Психрометр аспирационный с электромотором М-34.

**Практическое значение.** Представление о влажности воздуха очень важно потому, что влажность воздуха сказывается на характере технического обслуживания автомобилей, строительства дорог, мостов, автомагистралей, а также на самочувствии людей.

### Краткие теоретические сведения

Состояние заданной массы вещества определяется значениями трех параметров: давления  $P$ , объема  $V$ , температуры  $T$ . Аналитическая связь между этими параметрами в виде функции  $f(p, V, T) = 0$  называется уравнением состояния. Переход из одного состояния  $(p_1, V_1, T_1)$  в другое состояние  $(p_2, V_2, T_2)$  называется процессом.

Газ, для которого потенциальная энергия взаимодействия молекул во много раз меньше их кинетической энергии движения, называется идеальным. Если это условие не выполняется, то газ будет реальным. Рассмотрим процесс сжатия вещества при постоянной температуре (рисунок 7.1). Предполагаем, что сначала вещество газообразное.

При уменьшении объема давление газа будет расти (участок 1–2 рисунок 7.1). По достижению объема  $V_r$  (точка 2) давление перестает меняться, а вещество перестает быть однородным – часть газа конденсируется в жидкость. Происходит расслоение вещества на две фазы: жидкую и газообразную. По мере дальнейшего уменьшения объема все большая часть вещества переходит в жидкую фазу, причем переход осуществляется при постоянном давлении  $p_{н.п.}$  (давление насыщенного пара).

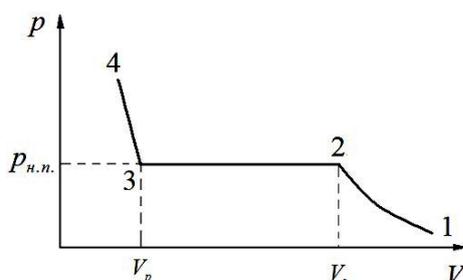


Рисунок 7.1 – График зависимости  $p$  от  $V$  для сжатия вещества при постоянной температуре

После того как процесс конденсации вещества заканчивается (это происходит при достижении объема  $V_p$ , точка 3, рисунок 7.1) дальнейшее уменьшение объема сопровождается быстрым увеличением давления (отрезок 3–4), поскольку жидкость несжимаема. Реальный газ, который находится в термодинамическом равновесии с жидкостью (отрезок 2–3 рисунок 7.1) называется насыщенным паром этой жидкости. Эксперименты показали, что давление насыщенного пара для разных веществ неодинаково. Таким образом, давление насыщенного пара является одной из характеристик вещества. Экспериментальное изучение зависимости давления насыщенного пара от температуры показало, что с увеличением температуры давление насыщенного пара растет. В таблице 7.1 приведена зависимость давления и плотности насыщенного пара  $H_2O$  от температуры.

Таблица 7.1 – Давление  $p$  и плотность  $\rho$  насыщенного водяного пара при разной  $t^\circ C$

$t^\circ C$	$p$		$\rho, \text{г/м}^3$	$t,^\circ C$	$p$		$p$
	кПа	мм рт. ст.			кПа	мм рт. ст.	
20	0,103	0,772	0,88	16	1,817	13,63	13,65
-10	0,259	1,95	2,14	17	1,937	14,53	14,50
-5	0,401	3,01	3,25	18	2,062	15,47	15,39
-4	0,437	3,28	3,53	19	2,196	16,47	16,32
-3	0,463	3,47	3,83	20	2,337	17,53	17,32
-2	0,517	3,88	4,14	21	2,486	18,65	18,35
-1	0,563	4,22	4,49	22	2,642	19,82	19,44
0	0,611	4,58	4,85	23	2,809	21,07	20,60
1	0,656	4,92	5,20	24	2,984	22,38	21,81
2	0,705	5,59	5,57	25	3,168	23,76	23,07
3	0,757	5,68	5,95	26	3,361	25,21	24,40
4	0,813	6,10	6,37	27	3,565	26,74	25,79
5	0,872	6,54	6,80	28	3,780	28,35	27,26
6	0,935	7,01	7,27	29	4,005	30,04	28,7
7	1,005	7,54	7,70	30	4,242	31,82	30,3
8	1,072	8,04	8,28	40	7,376	55,32	51,2
9	1,148	8,61	8,83	50	12,333	92,51	83,2
10	1,227	9,20	9,41	60	19,915	149,38	130,5
11	1,312	9,84	10,02	70	31,158	233,71	198,4
12	1,401	10,51	10,67	80	47,302	355,12	354,1
13	1,497	11,23	11,37	90	70,093	525,76	424,1
14	1,597	11,98	12,08	100	101,325	760,00	598,0
15	1,704	12,78	12,84	200	1555	11664	7099

Если насыщенный пар охлаждать, то при достижении некоторой температуры  $T_p$  пар станет насыщенным и дальнейшее охлаждение приведет к частичной конденсации. Температура  $T_p$  называется точкой росы.

Отметим, что при температурах, далеких от критической (при этой температуре горизонтальный участок изотермы сворачивается в точку), отличие между объемами жидкости и пара будет намного большим, чем показано на рисунке 7.1. Например, удельный объем насыщенного водяного пара при  $100^\circ \text{C}$  в 1600 раз превышает удельный объем жидкой воды при той же температуре.

## ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА

В воздухе всегда есть водяной пар. Он образуется в результате испарения воды с поверхности океанов, морей, озер, водохранилищ, рек и др. От количества водяного пара, который находится в воздухе, зависит погода, самочувствие человека, функционирование многих его органов, жизнь растений, а также сохранение технических объектов, архитектурных сооружений, произведений искусства. Поэтому очень важно следить за влажностью воздуха, уметь измерять ее.

Водяной пар, который находится в воздухе, обычно ненасыщенный. Если бы водяной пар в воздухе был насыщенным, то поверхность Земли и все, что на ней находится, было бы покрыто капельками жидкости и никогда бы не высыхало.

Наоборот, чем дальше водяной пар, который находится в воздухе, от насыщения, тем воздух суше.

*Абсолютной влажностью воздуха*  $f$  называется масса водяного пара, которая находится в  $1 \text{ м}^3$  воздуха при данных условиях. Значение  $f$  оценивается плотностью водяного пара в воздухе. Обычно ее выражают не в СИ, а в  $\text{г/м}^3$ :

$$f = \rho_{\text{пара}} \text{ (г / м}^3 \text{ )}. \quad (7.1)$$

В метеорологии абсолютная влажность оценивается давлением водяного пара, которая выражается в миллиметрах ртутного столбца:  $f = p$  (мм рт. ст.). При комнатных температурах ( $T \approx 300^\circ \text{K}$ )  $p$  (мм рт. ст.)  $\approx \rho$  ( $\text{г/м}^3$ ).

Поэтому, сравнив давление водяного пара, который есть в воздухе, с давлением насыщенного водяного пара при данной температуре, можно судить о влажности воздуха. Для этой цели введена особая величина, которая названа *относительной влажностью воздуха*.

Относительной влажностью воздуха  $\phi$  называют выраженное в процентах отношение давления водяного пара  $p$ , который находится в воздухе, к давлению насыщенного пара  $p_{н.п.}$  при данной температуре:

$$\phi = \frac{p}{p_{н.п.}} \cdot 100 \% . \quad (7.2)$$

Испарение воды из водохранилищ, из предметов, которые содержат влагу, из растений, из открытых слизистых оболочек организма происходит тем быстрее, чем меньше относительная влажность атмосферного воздуха.

Для хорошего самочувствия и здоровья необходимо, чтобы относительная влажность была в пределах от 40 до 60 %. Однако в наших домах и школах в зимние месяцы относительная влажность часто не превышает 10 или 20 %. Такие условия вызывают быстрое испарение и высыхание слизистых оболочек носа, гортани, легких, которые приводят к простудным и другим заболеваниям.

Поэтому в зимнее время необходимо увлажнять воздух в жилых помещениях с помощью специальных приспособлений (например, с помощью пористых увлажнителей, которые прикрепляются на отопительных элементах).

### МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ

Для того, чтобы определить относительную влажность воздуха, необходимо:

- 1) измерить температуру воздуха и по таблице 7.1 найти давление насыщенного пара, которое отвечает этой температуре;
- 2) определить точку росы и по той же таблице найти давление водяного пара, который есть в воздухе;
- 3) по формуле (7.2) вычислить относительную влажность.

Для определения точки росы водяного пара, который находится в воздухе, созданы специальные приборы – *гигрометры*. Наиболее простым из них является гигрометр Ламбрехта (рисунок 7.2).

Основной частью этого прибора является металлический сосуд в форме цилиндра 3, ось которого занимает горизонтальное положение. Одно основание цилиндра сделано извне блестящим. Внутри цилиндра входит трубка 2, присоединяющаяся к какому-нибудь воздухоудвигному устройству, например к резиновой груше 1. Внутри цилиндра наливают эфир. Продувая через эфир воздух, ускоряют его испарение. При испарении эфир охлаждается и охлаждает цилиндр.

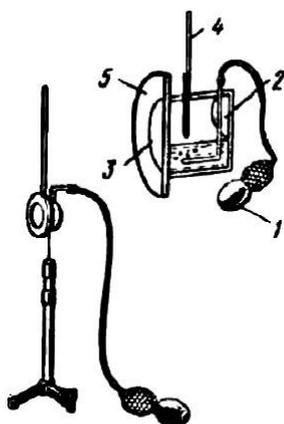


Рисунок. 7.2 – Общий вид гигрометра Ламбрехта

Когда температура цилиндра становится равной температуре точки росы, его поверхность «запотевает». Для измерения температуры внутрь цилиндра вставляют термометр 4. Для того, чтобы момент выпадения росы был более заметный, на цилиндр надевают кольцо 5, изолированное от него теплоизоляционной прокладкой.

Объясним на примере. Допустим, что температура воздуха  $25^{\circ}\text{C}$ , а точка росы, определенная с помощью гигрометра, оказалась равной  $10^{\circ}\text{C}$ . По таблице 7.1 находим, что этим температурам отвечают значения давления насыщенного пара 3168 Па и 1227 Па, соответственно. Поэтому относительная влажность

$$\phi = \frac{1227}{3168} \cdot 100 \% \approx 39 \%$$

Относительную влажность можно найти не только путем определения точки росы, но и с помощью специального прибора – *психрометра*. Психрометр состоит из двух термометров, шарик одного из них обернут тканью, нижний конец которого опущен в сосуд с дистиллированной водой (рисунок 7.3).

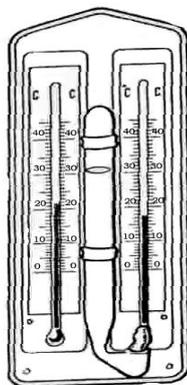


Рисунок 7.3 – Общий вид психрометра

Сухой термометр регистрирует температуру воздуха, а влажный – температуру испаряющейся воды. При испарении жидкости ее температура снижается. Чем суше воздух (меньше его относительная влажность), тем интенсивнее испаряется вода из влажной ткани и тем ниже ее температура. Таким образом, различие показаний сухого и влажного термометров (так называемая психрометрическая разность) зависит от относительной влажности воздуха. Зная эту разность температур, определяют относительную влажность воздуха по специальным психрометрическим таблицам (таблица 7.2). Существуют также приборы (гигрометры), по шкале которых относительная влажность воздуха в процентах находится непосредственно.

Таблица 7.2 – Психрометрическая таблица

Показание сухого термометра	Различие показаний сухого и смоченного термометров										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Относительная влажность, %										
0	100	81	63	45	28	11	–	–	–	–	–
2	100	84	68	51	35	20	–	–	–	–	–
4	100	85	70	56	42	28	14	–	–	–	–
6	100	86	73	60	47	35	23	10	–	–	–
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7	–	–
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	5	–
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	–
14	100	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
26	100	92	85	78	71	64	58	51	46	40	34
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

Рассмотрим пример на влажность: в помещении объемом  $150 \text{ м}^3$  влажность воздуха при температуре  $20^\circ \text{С}$  равна 30 %. Определить массу водяного пара в помещении.

*Анализ условия.* В помещении находится ненасыщенный водяной пар. Массу пара можно найти из уравнения Менделеева – Клапейрона:

$$m = \frac{pV\mu}{TR}$$

Из формулы относительной влажности

$$\phi = \frac{p}{p_{\text{н.п.}}}$$

выражаем давление пара, который есть в воздухе.

Давление насыщенного пара при 20° С найдем из таблицы 7.1 ( $p_{\text{н.п.}} = 2337$  Па).

*Решение.* Поскольку  $p = \phi p_{\text{н.п.}}$ , то

$$m = \frac{\phi p_{\text{н.п.}} V \mu}{RT}$$

Подставляя значения величин:

$$V = 150 \text{ м}^3; \quad T = 293 \text{ К}; \quad \phi = 30\% (\phi = 0,3);$$

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}; \quad R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}; \quad p_{\text{н.п.}} = 2337 \text{ Па},$$

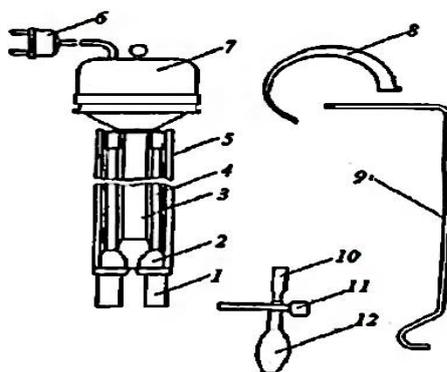
получаем

$$m = \frac{0,3 \cdot 2337 \cdot 150 \cdot 18 \cdot 10^{-3}}{8,31 \cdot 293} = 0,777 \text{ кг}.$$

### Описание оборудования

1. Принцип работы психрометра основан на разности показаний сухого и смоченного термометров в зависимости от влажности окружающего воздуха.

2. Психрометр состоит из двух одинаковых ртутных термометров 4 (рисунок 7.4), закрепленных в термодержателе, который состоит из трубок защиты 1, аспирационной чашки 2, воздухопроводной трубки 3 и термозащиты 5.



- 1–трубка защиты; 2–чашка аспирационная; 3–трубка воздухопроводная;  
 4–термометр ртутный; 5–термозащита; 6–вилка штепсельная;  
 7–аспираторная головка; 8–ветрозащита; 9–крючок; 10–пипетка;  
 11–зажим для резиновых трубок; 12–баллон

Рисунок 7.4 – Психрометр аспирационный с электродвигателем М-34

Резервуары термометров размещены в трубке защиты с воздушным зазором между ними. Назначение трубок защиты – защищать резервуары термометров от нагревания солнцем, для чего внешняя поверхность трубок тщательно полируется и никелируется. Сами трубки изолированы одна от другой теплоизоляционными шайбами.

Трубки защиты соединены аспирационной чашкой с воздухопроводной трубкой, на верхнем конце которой закреплена аспирационная головка 7. Аспирационная головка имеет электромотор и вентилятор. Для подключения к сети психрометр оснащен шнуром с вилкой 6. Термометры защищены по бокам от механических повреждений термозащитами. К психрометру добавляется ветровая защита 8. Для подвешивания психрометра есть крючок 9, на одном конце которого есть крючок с прорезью. Крючок прибивают гвоздями к специальному столбу и на него навешивают психрометр. Перед работой резервуар правого термометра обертывают батистом в один пласт и смачивают чистой дистиллированной водой с помощью резинового баллона 12 с пипеткой.

## **ПОРЯДОК РАБОТЫ И НАБЛЮДЕНИЙ**

1. Психрометр работает таким образом. При вращении вентилятора в психрометр поступает воздух, который, обтекая резервуары термометров, проходит по воздухопроводной трубке к вентилятору и удаляется им наружу через прорези в аспирационной головке.

Благодаря протеканию потока воздуха вокруг резервуаров термометров, сухой термометр будет показывать температуру этого потока, а показание смоченного термометра будут меньше из-за охлаждения вследствие испарения воды с поверхности батиста, который оборачивает резервуар.

Влажность воздуха определяется по показаниям сухого и смоченного термометров по специальным психрометрическим таблицам или психрометрическому графику (рисунок 7.5), а температура воздуха – по показаниям сухого термометра.

Во время отсчета необходимо строго следить за тем, чтобы ветер дул в направлении от психрометра к наблюдателю.

2. Порядок работы с психрометром следующий:

а) смачивают батист на резервуаре термометра. Для этого берут резиновый баллон с пипеткой, заранее наполненный дистиллированной водой, и с легким нажимом доводят воду в пипетке до черточки. Если черточка отсутствует, то доводят воду не ближе чем на 1 см к краю пипетки и удерживают ее на этом уровне с помощью зажима 11. После этого пипетку вводят до конца во внутреннюю трубу защиты и смачивают батист на резервуаре термометра. Выждав некоторое время, не вынимая

пипетки из трубки, разжимают зажим, убирая лишнюю воду из баллона, после чего пипетку вынимают;

б) включают электромотор;

в) через 4 минуты после включения электромотора снимают показание термометров.

Вычисление влажности воздуха (абсолютной и относительной) по показаниям психрометра проводится по психрометрическим таблицам. Определение относительной влажности по показаниям психрометра можно делать и по психрометрическому графику (рисунок 7.5).

Определение относительной влажности по психрометрическому графику выполняется в следующем порядке:

– по вертикальным линиям отмечают показание сухого термометра, а по косым – показание смоченного термометра;

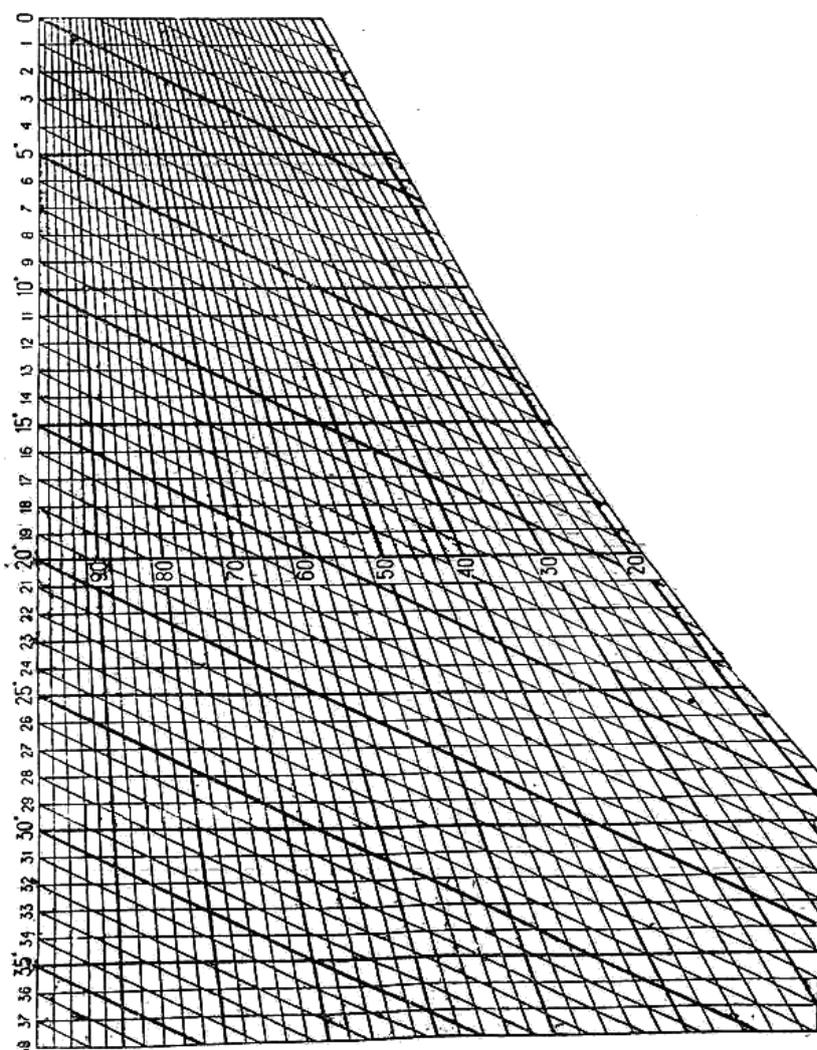


Рисунок 7.5 – Психрометрический график

– на пересечении этих линий получают значение относительной влажности, выраженной в процентах. Линии, соответствующие десяткам процентов, обозначены на графике цифрами: 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 и 90.

*Пример.* Температура сухого термометра  $21,7^{\circ}\text{C}$ , температура смоченного термометра  $14,3^{\circ}\text{C}$ . На графике находим точку пересечения вертикальной и наклонной линий, которые отвечают данным температурам; она находится выше 42, и ниже 44. Итак, относительная влажность будет приблизительно 43 %.

Пользоваться психрометрическим графиком удобно в том случае, если необходимо определить только относительную влажность. Поскольку при определении абсолютной влажности приходится пользоваться психрометрическими таблицами, то и все вычисления проще вести только по таблицами.

Результаты наблюдений заносим в таблицу 7.3.

Таблица 7.3 – Результаты измерений

$t_{\text{сухого}}$	$t_{\text{влажного}}$	$\phi$ %	Ошибка $\Delta\phi$ %

Ошибка  $\Delta\phi$  % определяем по таблице 7.4.

Таблица 7.4 – Результаты измерений

Температура воздуха $^{\circ}\text{C}$	Относительная влажность, %									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	Ошибка, %									
-10	$\pm 9$	$\pm 9$	$\pm 9$	$\pm 8$	$\pm 7$	$\pm 6$	$\pm 6$	$\pm 5$	$\pm 5$	$\pm 5$
0	$\pm 7$	$\pm 6$	$\pm 6$	$\pm 5$	$\pm 5$	$\pm 4$	$\pm 4$	$\pm 3$	$\pm 3$	$\pm 3$
10	$\pm 5$	$\pm 5$	$\pm 4$	$\pm 3$	$\pm 3$	$\pm 3$	$\pm 3$	$\pm 2$	$\pm 2$	$\pm 2$
20	$\pm 4$	$\pm 4$	$\pm 3$	$\pm 3$	$\pm 3$	$\pm 3$	$\pm 2$	$\pm 2$	$\pm 2$	$\pm 2$
30	$\pm 3$	$\pm 3$	$\pm 2$	$\pm 1$						
40	$\pm 2$	$\pm 2$	$\pm 2$	$\pm 2$	$\pm 2$	$\pm 2$	$\pm 1$	$\pm 1$	$\pm 1$	$\pm 1$

### Задание

1. Определить влажность атмосферы, используя результаты наблюдений (таблица 7.3) и психрометрическую таблицу 7.2. Сравнить результаты.

2. Определить абсолютную влажность воздуха:

а) плотность пара в помещении;

б) давление водяного пара.

3. Определить массу водяного пара в помещении.

4. Определить точку росы.

### Контрольные вопросы и задачи

1. Какой пар называют насыщенным?

2. Зависит ли давление насыщенного пара от объема, от температуры вещества?

3. Подлежит ли насыщенный пар газовым законам?
4. Что называется точкой росы?
5. Что называется абсолютной и относительной влажностью?
6. Как можно определить относительную влажность?
7. Как устроен психрометр и как им пользоваться?
8. Почему показание влажного термометра ниже сухого?
9. В комнате объемом  $120 \text{ м}^3$  при температуре  $15^\circ \text{ С}$  относительная влажность  $60 \%$ . Определите массу водного пара в воздухе комнаты. Давление насыщенного водного пара при  $15^\circ \text{ С}$  равняется  $1705 \text{ Па}$ .

## Лабораторная работа 8

**Тема. Определение постоянной Больцмана.**

**Цель.** Экспериментально определить постоянную Больцмана.

**Приборы и материалы.** Термоизолированный стеклянный баллон вместительностью  $15\text{--}20 \text{ л}$ , медицинский шприц на  $1\text{--}2 \text{ см}^3$ , лабораторный термометр, U – образный водяной манометр, эфир.

**Практическое значение.** Во многих законах физики фигурирует постоянная Больцмана, которую нужно уметь находить экспериментально разными способами.

### Краткие теоретические сведения

Температуру, исходя из ее молекулярно-кинетического толкования, нужно измерять в единицах энергии. Однако это очень неудобно на практике (необходимо оперировать очень малыми числами: температуре в  $1 \text{ К}$  отвечает энергия  $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}$ , процедура измерения при этом значительно затруднена). Множитель  $k$ , который выражает соотношение между единицей энергии (джоулем) и температурой (кельвином), называют *постоянной Больцмана*. Ее числовое значение устанавливается экспериментально разными методами. Постоянная Больцмана фигурирует во всех законах, которые содержат классические или квантовые функции распределения частиц по энергиям. Самое точное значение постоянной Больцмана получаем из равенства  $k = \frac{R}{N_A}$ , где  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $N_A$  – число Авогадро.

В работе определение постоянной Больцмана основывается на использовании уравнения состояния идеального газа Менделеева – Клапейрона.

Прибор для определения постоянной Больцмана  $k$  (рисунок 8.1) составными частями имеет стеклянный толстостенный баллон 1, который соединяется через выводную резиновую трубку 3 с жидкостным

манометром 4. В пробке баллона закреплена медицинская игла 2 для введения через нее шприцем жидкости, которая легко испаряется (эфир).

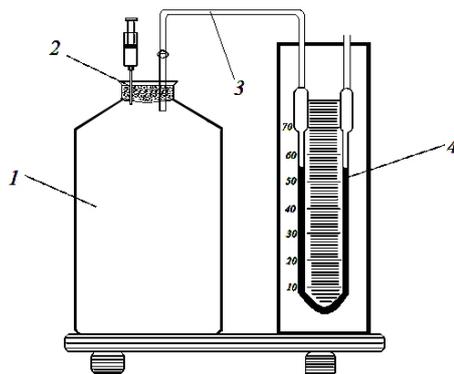


Рисунок 8.1 – Прибор для определения постоянной Больцмана

После введения эфира в баллоне создастся избышек давления на величину парциального давления  $\Delta p$  газообразного эфира. Величину  $\Delta p$  определяют манометром.

В основу опытного определения постоянной Больцмана положено уравнение состояния идеального газа  $\Delta p V = \frac{\Delta m}{\mu} R T$ , из которого получаем

$$\Delta p = \frac{\Delta m}{\mu} \frac{R T}{V} = \frac{\Delta m}{\mu} \frac{k N_A T}{V} = k N_0 T, \quad (8.1)$$

где  $\frac{\Delta m}{\mu}$  – число молей введенного в баллон эфира;

$V$  – заданный рабочий объем баллона;

$T$  – температура газовой смеси в баллоне;

$N_0 = \frac{\Delta m N_A}{\mu V}$  – количество молекул эфира в единице объема баллона

(для эфира  $\mu = 76$  кг / кмоль).

Парциальное давление паров эфира в баллоне уравнивается разностью уровней столбиков жидкости  $\Delta h$  в манометре

$$\Delta p = \rho g \Delta h, \quad (8.2)$$

где  $\rho$  – плотность манометрической жидкости (задается заведомо при соответствующих температурах опыта).

С другой стороны

$$\Delta m = \rho_e V_e, \quad (8.3)$$

где  $\rho_e$  – плотность эфира ( $\rho_e = 714$  кг / м<sup>3</sup>);

$V_e$  – объем введенного эфира.

Итак, для  $N_0$  имеем

$$N_0 = \frac{\rho_e V_e}{\mu} \frac{N_A}{V}. \quad (8.4)$$

Подставив (8.2) и (8.4) в (8.1), получаем

$$k = \frac{\Delta p}{N_0 T} = \frac{\rho g \mu V}{\rho_e V_e N_A T} \Delta h = B \frac{\Delta h}{V_e T}, \quad (8.5)$$

где  $B = \frac{\rho g \mu V}{\rho_e N_A}$  – постоянный, в условиях опыта, коэффициент.

### Порядок выполнения работы

1. Обеспечить надежную тепловую защиту баллона прозрачным теплозащитным экраном.

2. Наполнить медицинский шприц с иглой одним-двумя кубическими сантиметрами эфира. Снять со шприца иглу и вставить его в иглу 2 баллона; при этом уровни манометрической жидкости в коленах манометра должны быть одинаковыми.

3. Нажимая на поршень шприца, ввести в баллон эфир объемом  $V_e$ ; для сохранности герметизации оставить шприц в игле 2.

4. После выпаривания эфира зафиксировать стабильную разность уровней жидкости в коленах манометра  $\Delta h$  при соответствующей температуре.

5. Опыт повторить 3–5 раз, каждый раз дозируя разные объемы эфира, вводимого в баллон.

6. Найти среднее значение величины  $k$ , сравнить с табличным.

7. Сделать выводы относительно методики и результатов измерений.

### Контрольные вопросы

1. Какой газ называется идеальным?
2. Приведите уравнение состояния идеального газа.
3. Какое физическое содержание универсальной газовой постоянной?
4. Опишите известные Вам методы определения постоянной Больцмана.
5. Приведите законы, в которых фигурирует постоянная Больцмана.
6. Какие источники погрешностей в этой работе?

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Общая физика: лабораторный практикум: уч. пособ. / В.М. Барановский, П.В. Бережний, И.Т. Горбачук. – К.: Вишняя школа, 1992. – 509 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 1. Механика. Молекулярная физика: учебн. пособ. – 2-е изд. / И.В. Савельев. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 432 с.
3. Трофимова Т.И. Курс физики: учебн. для студентов вузов / Т. И. Трофимова. – М.: Высш. шк., 1985. – 432 с.
4. Детлаф А.А. Справочник по физике / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980.
5. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики / В.С. Волькенштейн. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 351 с.
6. Физический энциклопедический словарь / [гл. ред. А.М. Прохоров; ред. кол. Д. М. Алексеев, А.М. Бонч-Бруевич, А.С. Боровик-Романов и др.]. – М.: Сов. энциклопедия, 1983. – 928 с.
7. Руководство к лабораторным занятиям по физике/ Л.Л. Гольдин, Ф.Ф. Игошин, С.М. Козел и др. – М.: Наука, 1973. – 687 с.

## Приложение А

## Обработка экспериментальных данных с помощью ЭВМ

1. Включить ЭВМ и принтер. Вставить бумагу.
2. Войти в каталог TERMODINAMIKA.
3. Запустить нужный файл:

Номер лабораторной работы	Название exe - файла
1г	1г. exe
2г	m1582_2.exe
3г	m1583_2.exe
4г	
5г	
6г	
7г	
8г	

4. Ввести: фамилия, имя и отчество, название группы, дату выполнения расчетов.
5. Результаты компьютерной обработки лабораторной работы показать преподавателю, а потом подклеить их в тетрадь.

Приложение Б  
Коэффициент Стьюдента  $t_{\alpha,n}$

Таблица Б.1

n	$\alpha$	
	0,9	0,95
2	6,31	12,7
3	2,92	4,3
4	2,35	3,18
5	2,13	2,78
6	2,02	2,57
7	1,94	2,45
8	1,90	2,37
9	1,86	2,31
10	1,83	2,26
11	1,81	2,23
12	1,80	2,20
13	1,78	2,18
14	1,77	2,16
15	1,76	2,15
16	1,75	2,13
17	1,75	2,12
18	1,74	2,11
19	1,73	2,10
20	1,73	2,09
21	1,73	2,09
22	1,72	2,08
23	1,72	2,07
24	1,71	2,07
25	1,71	2,06
26	1,71	2,06
27	1,71	2,06
28	1,70	2,05
29	1,70	2,05
30	1,70	2,05
31	1,70	2,04

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ИЗДАНИЕ

**Галиахметов** Алмаз Мансурович  
**Ефремова** Мария Поликарповна  
**Ставцев** Валерий Васильевич  
**Косенко** Ульяна Вячеславовна

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ  
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
«ФИЗИКА» (РАЗДЕЛ «МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И  
ТЕРМОДИНАМИКА»)) ДЛЯ СТУДЕНТОВ НАПРАВЛЕНИЙ  
ПОДГОТОВКИ: 23.03.03 «ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТРАНСПОРТНО-  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН И КОМПЛЕКСОВ, 23.05.01 «НАЗЕМНЫЕ  
ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА», 08.03.01  
«СТРОИТЕЛЬСТВО», 20.03.01 «ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ»,  
08.05.03 «СТРОИТЕЛЬСТВО, ЭКСПЛУАТАЦИЯ, ВОСТАНОВЛЕНИЕ И  
ТЕХНИЧЕСКОЕ ПРИКРЫТИЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ, МОСТОВ И  
ТОННЕЛЕЙ», 27.03.04 «УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»,  
23.03.01 «ТЕХНОЛОГИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОЦЕССОВ».**

Подписано к выпуску 24.11.2016 г. Гарнитура Times New.  
Усл. печ. л. 3,75. Зак. № 678 .

---

Государственное образовательное учреждение  
Высшего профессионального образования  
«Донецкий национальный технический университет»  
Автомобильно-дорожный институт  
84646, ДНР, г. Горловка, ул. Кирова, 51  
e-mail: print-adi@adidonntu.ru

Редакционно-издательский отдел