

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный университет  
имени Франциска Скорины»

**И. П. Кравченко, Д. Г. Лин**

**ОБЩАЯ ФИЗИКА:  
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА**

Практическое руководство

для студентов специальностей  
1-31 03 01- 02 «Математика  
(научно-педагогическая деятельность)»  
и 1-40 01 01 «Программное обеспечение  
информационных технологий»

Гомель  
ГГУ им. Ф. Скорины  
2014

УДК 539.2(076)  
ББК 22.36я73  
К343

Рецензенты:

кандидат физико-математических наук П. С. Шаповалов;  
кандидат физико-математических наук В. Е. Гайшун

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом  
учреждения образования «Гомельский государственный университет  
имени Франциска Скорины»

**Кравченко, И. П.**

К343      **Общая физика: молекулярная физика: практ. рук-во для  
студентов математического факультета / И. П. Кравченко,  
Д. Г. Лин ; М-во образования РБ, Гом. гос. ун-т  
им. Ф. Скорины. – Гомель: ГГУ им Ф. Скорины, 2014. – 44 с.  
ISBN 978-985-439-939-3**

Издание имеет целью способствовать выработке у студентов навыков самостоятельно ориентироваться в изучаемом материале курса, выполнять необходимые измерения, обрабатывать полученные экспериментальные результаты. С учётом этой цели, пособие содержит краткий теоретический материал, который студент должен изучить до выполнения лабораторной работы, обоснование выполняемого опыта и методику проведения эксперимента.

Практическое руководство адресуется студентам, изучающим основные положения курса молекулярной физики и методы проведения физического эксперимента в ходе выполнения лабораторного практикума.

УДК 539.2(076)

ББК 22.36я73

**ISBN 978-985-439-939-3**

© Кравченко И. П., Лин Д. Г., 2014  
© УО «Гомельский государственный  
университет им. Ф. Скорины», 2014

## Содержание

Предисловие.....	4
Лабораторная работа 1. Определение коэффициента внутреннего трения воздуха.....	5
Лабораторная работа 2. Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса.....	10
Лабораторная работа 3. Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом отрыва проволочного контура.....	18
Лабораторная работа 4. Определение влажности воздуха.....	25
Лабораторная работа 5. Определение удельной теплоёмкости твёрдых тел.....	33
Лабораторная работа 6. Определение среднего коэффициента линейного расширения твердых тел.....	38
Литература .....	43

## Предисловие

Данное пособие составлено в соответствии с действующими учебными программами для специальностей 1-31 03 01- 02 «Математика (научно-педагогическая деятельность)»; 1-40 01 01 «Программное обеспечение информационных технологий» и предназначено для студентов дневной формы обучения. При составлении описаний лабораторных работ учтён многолетний опыт проведения занятий по молекулярной физике, а также существующая материально-техническая база лаборатории.

Издание имеет целью способствовать выработке у студентов навыков самостоятельно ориентироваться в изучаемом материале курса, выполнять необходимые измерения, обрабатывать полученные экспериментальные результаты. С учётом этой цели, пособие содержит краткий теоретический материал, который студент должен изучить до выполнения лабораторной работы, обоснование выполняемого опыта и методику проведения эксперимента.

# Лабораторная работа 1

## Определение коэффициента внутреннего трения воздуха

**Цель работы:** экспериментальное определение параметров, характеризующих внутреннее трение воздуха.

**Приборы и принадлежности:** установка для определения коэффициента внутреннего трения воздуха, мерный стакан, секундомер, емкость для сбора жидкости.

### Теоретические сведения по теме

Установлено, что при медленном течении газа по трубке небольшого сечения (капилляра) под действием постоянной внешней разности давлений, он движется послойно. Скорость движения слоя, прилегающего к стенкам капилляра, из-за прилипания молекул газа к стенкам, близка к нулю. Вдоль оси капилляра газ движется с максимальной скоростью. Вследствие хаотического (теплого) движения молекул между движущимися друг относительно друга слоями газа происходит постоянный обмен молекулами. Это приводит к передаче импульса от слоя, движущегося вдоль оси, к периферийным слоям газа, движущимся с меньшими скоростями. В результате этого медленные слои ускоряются, а более быстрые замедляются. Такое взаимодействие слоев газа, препятствующее перемещению одного слоя относительно другого, называется вязкостью или внутренним трением. Количественно вязкость определяется величиной касательной силы, которая должна быть приложена к площади сдвигаемого слоя, для поддержания его ламинарного течения.

Под ламинарным течением понимается параллельное движение слоев газа с градиентом скорости, перпендикулярным направлению движения молекул. Вязкость газа в целом не зависит от его плотности (давления газа), так как при сжатии газа общее количество молекул, переходящих из слоя в слой, увеличивается, но зато каждая молекула менее глубоко проникает в соседний слой, и соответственно переносит меньший импульс. Для очень разреженных газов понятие вязкости теряет смысл.

Французским ученым Пуазёйлем был установлен закон течения жидкости в тонкой цилиндрической трубке. Этот закон записывается следующим образом: объем  $V$  жидкости, протекающий через поперечное сечение трубки диаметром  $d$  за время  $t$  при установившейся

разности давлений  $p$  и  $p_0$  на концах трубки на длине  $l$ , прямо пропорционален перепаду давлений  $p$  и  $p_0$  на ее концах, четвертой степени диаметра  $d$  трубки, времени протекания  $t$  и обратно пропорционален длине трубки  $l$  и коэффициенту вязкости  $\eta$ :

$$V = \frac{\pi d^4 (p - p_0) t}{\eta \cdot l}. \quad (1.1)$$

Закон Пуазёйля применим только при ламинарном течении жидкости или газа и при постоянной разности давлений на концах трубки. Пропуская жидкость или газ через трубку известного радиуса, измеряют перепад давления и объем потока. Затем, используя полученные данные, вычисляют коэффициент вязкости  $\eta$ .

Закон Пуазёйля можно использовать не только для определения вязкости жидкостей, но и газов. Он применим к жидкостям и газам при условии, что плотность среды в процессе движения не испытывает сколь-нибудь заметного изменения, то есть ее можно считать постоянной. В таких случаях движущуюся среду считают несжимаемой. Хотя с обычной точки зрения газ является легко сжимаемой средой, но те изменения его давления, которые происходят при движении, обычно невелики. Газ перестает вести себя как несжимаемая среда лишь при скоростях сравнимых со скоростью звука.

## Описание установки

Для испытаний используют установку, фотография которой приведена ниже (рисунок 1.1). Установка состоит из стеклянного баллона с водой ( $B$ ), манометра ( $M$ ), капилляра ( $K$ ), соединительных трубок, сосудов для сбора воды.

При открытом кране из баллона вытекает вода. При этом давление в нём уменьшается и происходит засасывание воздуха через капилляр  $K$ , являющийся основным элементом устройства. Объем воздуха, протекающего через капилляр, равен объёму воды, вытекающей из баллона за то же самое время. Один конец капилляра, через который протекает воздух, с помощью тройника соединяется с атмосферой и правым коленом манометра. Другой конец капилляра с помощью такого же тройника соединяется со стеклянным баллоном и левым коленом манометра. Разность давлений газа на концах капилляра равна разности между атмосферным давлением и давлением в баллоне  $\Delta p = p - p_0$ .



Рисунок 1.1 – Установка для определения коэффициента вязкости воздуха

Эту разность можно измерить с помощью манометра,

$$\Delta p = \rho_g \cdot g \cdot \Delta h ,$$

где  $\Delta h$  – разность уровней воды в коленах манометра;

$\rho_g$  – плотность воды;

$g$  – ускорение свободного падения.

Для расчетов коэффициента вязкости  $\eta$  выразим его из формулы (1.1):

$$\eta = \frac{\pi \cdot d^4 \cdot \Delta p \cdot t}{V \cdot l} . \quad (1.2)$$

В данной работе измерения проводятся при небольших разностях давлений на концах капилляра.

## Подготовка к выполнению работы и проведение измерений

1. Наполните баллон водой на  $\frac{3}{4}$  объема и плотно закройте пробкой.
2. Подставьте под кран сосуд для сбора вытекающей воды. Откройте кран (вода должна течь однородной струйкой, для того чтобы течение

воздуха, засасываемого в капилляр при вытекании воды, было близким к ламинарному). Подождите, пока разность высот жидкости в коленях манометра установится на постоянном уровне ( $\Delta h = \text{const}$ ).

3. При установившемся течении воздуха через капилляр найдите разность высот  $\Delta h$ . Далее замените сосуд для сбора вытекающей воды на пустой мерный стакан и одновременно включите секундомер. Измерьте время, за которое из баллона вытечет заданный преподавателем объем воды.

4. Результаты измерений занесите в таблицу 1.1. Повторите опыт три раза.

5. Проведите измерения для других значений объема вытекающей из баллона жидкости.

6. По формуле  $\Delta p = \rho g \Delta h$  рассчитайте разность давлений  $\Delta p$  и выразите её в Паскалях. Результаты вычислений занесите в таблицу 1.1.

7. По формуле (1.2) рассчитайте коэффициент динамической вязкости воздуха.

8. Сравните полученные значения коэффициента внутреннего трения воздуха, измеренные для разных объёмов вытекающей жидкости.

9. Объясните, почему разность давлений в капилляре изменяется при больших объёмах вытекшей жидкости.

10. Сравните среднее значение полученного коэффициента со значением, заданным в таблице справочных величин.

Таблица 1.1 – Определение коэффициента внутреннего трения воздуха

№ п/п	$V, \text{ м}^3$	$\Delta h, \text{ мм}$	$t, \text{ с}$	$\Delta P, \text{ Па}$	$\eta, \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$
1					
2					
3					
...					

*Дополнительные данные, необходимые для выполнения расчетов:*

$$d = 1,17 \text{ мм}; \quad l = 116,5 \text{ мм}; \quad \mu = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг моль}^{-1};$$

$$\rho = 1,0 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad g = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

## Вопросы для самоконтроля

1. Что понимают под внутренним трением воздуха?

2. Какое течение газа (жидкости) называется ламинарным?
3. Запишите и сформулируйте закон Пуазёйля.
4. От чего зависит коэффициент вязкости газов?
5. Чем объяснить, что вязкость жидкостей и газов зависит от температуры неодинаково?
6. Почему при больших объёмах вытекающей жидкости разность уровней в коленах манометра не устанавливается постоянной?

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

## Лабораторная работа 2

### Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса

#### Цель работы:

- 1) изучить явление внутреннего трения в жидкостях;
- 2) ознакомиться с различными методами определения коэффициента вязкости жидкостей;
- 3) определить коэффициент вязкости жидкости методом Стокса.

**Приборы и принадлежности:** стеклянный цилиндр с исследуемой жидкостью, металлические шарики, секундомер, микроскоп.

#### Теоретические сведения по теме

Вязкость (ее также называют внутренним трением) – свойство текучих веществ (жидкостей и газов) сопротивляться перемещению одной их части относительно другой под действием внешних сил. Количественно вязкость определяется величиной касательной силы, которая должна быть приложена ко всей площади сдвигаемого слоя, чтобы поддерживать в этом слое режим ламинарного течения с постоянной скоростью относительного сдвига. Согласно молекулярно-кинетической теории, вязкость газов и жидкостей вызвана передачей импульса от молекул более быстро движущегося слоя к молекулам более медленно движущегося слоя.

Различают стационарное, ламинарное и турбулентное движение жидкости. При стационарном течении жидкость протекает сплошным потоком, при этом скорости молекул одинаковы по величине и направлению. Стационарное течение характерно для маловязких жидкостей, при относительно больших сечениях трубы и небольших скоростях течения. При ламинарном течении (рисунок 2.1) частицы жидкости движутся с постоянными по направлению скоростями, образуя параллельные слои, которые не перемешиваются друг с другом. Ламинарное течение характерно для вязких жидкостей, текущих с достаточно малыми скоростями, а также при медленном обтекании жидкостью тел малых размеров. В частности, ламинарное течение наблюдается при течении жидкостей в узких (капиллярных) трубках. Течение жидкости, при котором имеет место завихрение и перемешивание слоев, называется

турбулентным течением. При таком течении частицы жидкости совершают неупорядоченные и неустановившиеся движения, что приводит к их интенсивному перемешиванию.

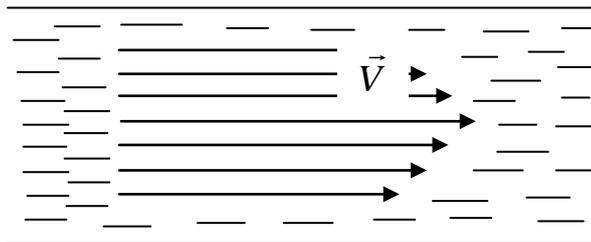


Рисунок 2.1 – Ламинарное течение жидкости

Между соприкасающимися слоями жидкостей, движущихся с неодинаковыми скоростями, возникает сила, направленная вдоль плоскости соприкосновения слоев и препятствующая их относительному перемещению – сила внутреннего трения. Ньютон опытным путем установил, что сила внутреннего трения  $F$  пропорциональна площади соприкосновения движущихся слоев  $S$  и их градиенту скорости  $\frac{dV}{dx}$ ,

$$F = \eta \cdot S \frac{dV}{dx}, \quad (2.1)$$

где коэффициент пропорциональности  $\eta$  называют коэффициентом внутреннего трения исследуемой жидкости или коэффициентом динамической вязкости. Из формулы (2.1) коэффициент внутреннего трения равен:

$$\eta = \frac{F}{S \cdot \frac{dV}{dx}}. \quad (2.2)$$

Это выражение позволяет определить физический смысл коэффициента внутреннего трения как силу, возникающую между двумя соседними слоями, имеющими площадь соприкосновения  $S$ , равную единице, и движущимися относительно друг друга при градиенте их скоростей  $\frac{dV}{dx}$ , равном единице.

Единицей измерения коэффициента динамической вязкости в международной системе единиц измерений является:

$$[\eta] = \text{Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2 = \text{Па} \cdot \text{с}.$$

Градиент скорости  $\frac{dV}{dx}$  показывает, насколько быстро изменяется модуль скорости жидкости на единице длины в направлении, перпендикулярном направлению скорости движения слоёв жидкости.

Зная коэффициент внутреннего трения, можно получить ряд других показателей вязкости жидкости. Так, отношение коэффициента динамической вязкости жидкости к ее плотности называют коэффициентом кинематической вязкости.

$$K = \frac{\eta}{\rho}. \quad (2.3)$$

К другим характеристикам вязкости жидкостей относят условную вязкость – отношение времени истечения определенного объема исследуемой жидкости ко времени истечения такого же объема дистиллированной воды при температуре 20 °С.

Величина, обратная динамической вязкости  $\eta$ , называется текучестью:

$$\varphi = \frac{1}{\eta}. \quad (2.4)$$

При движении твёрдого тела в жидкости оно испытывает лобовое сопротивление движению. Если форма тела обтекаема, то в основном возникает трение между поверхностью тела и окружающей его жидкостью. При малых скоростях движения тела сила лобового сопротивления увеличивается пропорционально скорости. При относительно высоких скоростях движения сила лобового сопротивления принимается пропорциональной квадрату скорости. При движении тела шарообразной формы часть молекул жидкости прилегающего к нему слоя прилипает к поверхности тела и движется вместе с ним. Сила трения при этом возникает не между телом и жидкостью, а между слоем жидкости, адсорбированным на поверхности тела, и окружающей его жидкостью, которая находится в покое. Английский физик и математик Стокс установил, что для тел шарообразной формы, движущихся в жидкости с относительно небольшой скоростью, сила сопротивления движению жидкости  $F_c$  пропорциональна коэффициенту вязкости жидкости  $\eta$ , радиусу тела  $r$  и скорости его движения  $v$  (закон Стокса):

$$F_c = -6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot v. \quad (2.5)$$

Знак минус в формуле означает, что сила Стокса направлена в сторону, противоположную движению тела. При высоких скоростях движения тела закон Стокса нарушается.

Для определения коэффициента внутреннего трения жидкости используют приборы, называемые вискозиметрами. Принцип работы всех вискозиметров основывается на исследовании ламинарного течения жидкости, либо на исследовании движения тел в жидкости. Наиболее распространены капиллярные, ротационные, вискозиметры с движущимся шариком и ультразвуковые вискозиметры.

Определение вязкости капиллярными вискозиметрами основано на использовании закона Пуазёйля и состоит в измерении времени протекания определённого объёма жидкости через узкие трубки круглого сечения при заданном перепаде давления.

В ротационных вискозиметрах исследуемая вязкая среда находится в зазоре между двумя соосными телами (цилиндры, конусы, сферы и их сочетания), причём одно из тел (ротатор) вращается, а другое неподвижно. Вязкость определяется по величине крутящего момента силы при заданной угловой скорости.

Действие ультразвуковых вискозиметров базируется на измерении скорости затухания колебаний пластинки из магнитострикционного материала, погруженной в исследуемую жидкую среду. Колебания пластинки возбуждаются короткими импульсами ( $10 \div 30$  мкс) тока в катушке, намотанной на пластинку. Колебания пластинки затухают тем быстрее, чем больше вязкость среды. При колебаниях пластинки в катушке наводится ЭДС самоиндукции, пропорциональная скорости движения пластинки. При уменьшении ЭДС до некоторого порогового значения в катушку поступает новый возбуждающий импульс. Вязкость среды определяют по частоте следования возбуждающих импульсов.

Помимо вискозиметров, позволяющих выразить результаты измерений в единицах динамической или кинематической вязкости, существуют вискозиметры, служащие для измерения вязкости жидкостей в условных единицах (например, в секундах). Такой вискозиметр представляет собой сосуд с калиброванной сточной трубкой: вязкость оценивается по времени истечения определённого объёма жидкости.

Действие вискозиметра с движущимся шариком в цилиндре с исследуемой жидкостью основано на использовании закона Стокса. Вязкость жидкости определяется по скорости движения шарика в цилиндрическом сосуде с исследуемой жидкостью.

В данной работе для определения коэффициента динамической вязкости используется метод Стокса. На шарик массой  $m$  и радиуса  $r$ , свободно падающий в жидкости с вязкостью  $\eta$ , действуют три силы: сила тяжести  $m\vec{g}$ , выталкивающая сила Архимеда  $\vec{F}_A$  и тормозящая движение сила Стокса  $F_c$  (рисунок 2.2).

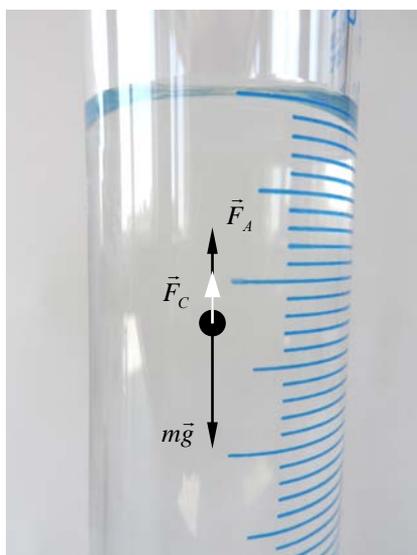


Рисунок 2.2 – Силы, действующие на шарик в жидкости

Так как сила тяжести и сила Архимеда постоянны, а сила Стокса возрастает по мере увеличения скорости шарика, то с некоторого момента эти силы уравниваются друг друга, после чего шарик будет двигаться равномерно. При этом:

$$mg = F_A + F_c . \quad (2.6)$$

Величину силы тяжести  $m\vec{g}$  можно представить как произведение плотности шарика на его объем и ускорение свободного падения  $mg = \rho_{ш} Vg$ ; а объем шарика находится по формуле:  $V = \frac{4}{3}\pi \cdot r^3$ . Окончательно

$$mg = \frac{4}{3}\pi \cdot r^3 \rho_{ш} g . \quad (2.7)$$

Согласно закону Архимеда на тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, численно равная весу вытесненной им жидкости:

$$F_A = m_{жс} g = V_{жс} \rho_{жс} g = \frac{4}{3}\pi \cdot r^3 \rho_{жс} g . \quad (2.8)$$

При этом объем вытесненной жидкости равен объёму шарика. Подставим (2.7), (2.8) и (2.5) в (2.6):

$$\frac{4}{3}\pi \cdot r^3 \cdot \rho_{ш} g = \frac{4}{3}\pi \cdot r^3 \rho_{жс} g + 6\pi\eta rV .$$

Из этого равенства выразим коэффициент динамической вязкости:

$$\eta = \frac{2}{9}(\rho_{ш} - \rho_{ж}) \frac{r^2 g}{V}. \quad (2.9)$$

Как видно из полученного выражения, для определения коэффициента динамической вязкости  $\eta$  необходимо знать плотности шарика  $\rho_{ш}$  и жидкости  $\rho_{ж}$ , радиус шарика  $r$  и установившуюся (предельную) скорость его движения  $v$ . Скорость движения шарика определяют как отношение расстояния  $l$  между двумя метками на рабочем цилиндре ко времени  $t$  прохождения шариком этого расстояния (рисунок 2.2).

$$V = \frac{l}{t}.$$

Закон Стокса применим только в случае безграничной жидкости. Если размеры шарика сравнимы с размерами сосуда, в котором он движется, то при определении коэффициента вязкости учитывают и размеры сосуда:

$$\eta^* = \frac{2}{9} g \cdot r^2 \frac{(\rho - \rho_{ж})}{V \left(1 + 2,4 \frac{r}{R}\right) \left(1 + 1,33 \frac{r}{h}\right)}. \quad (2.10)$$

Если размеры шарика  $r$  во много раз меньше радиуса сосуда  $R$  и высоты слоя жидкости  $h$ , то формула (2.10) переходит в (2.9). Вискозиметр Стокса применяется для измерения коэффициента внутреннего трения сравнительно вязких жидкостей, например, масел.

## Определение вязкости жидкости методом Стокса

### Порядок выполнения работы

На рисунке 2.3 представлено дополнительное оборудование, используемое при выполнении работы.

1. Поместите шарик на предметный столик микроскопа и получите его чёткое изображение. По окулярной шкале микроскопа сделайте отсчёты с левой и правой сторон шарика. Занесите их значения в таблицу 2.1.

2. Найдите разности значений показаний, и занесите в таблицу полученное значение диаметра шарика  $d_x$ , выраженное в делениях шкалы.



Рисунок 2.3 – Установка для определения вязкости методом Стокса

Таблица 2.1 – Определение коэффициентов вязкости

№ п/п	Отсчёт по шкале окулярного микроскопа, дел.		Диаметр шарика		$l, \text{ мм}$	Время падения, $t, \text{ с}$	Коэф- фициент динами- ческой вязкости $\eta, \text{ Па} \cdot \text{ с}$	Коэф- фициент кинема- тической вязкости $K, \text{ м}^2/\text{с}$	Теку- честь $\varphi, \text{ с}/\text{м}^2$
	<i>направление x</i>		дел.	мм					
	слева	справа							
1.									
2.									
3.									
	<i>направление y</i>								
	слева	справа							
1.									
2.									
3.									
	Среднее значение								

3. Поверните шкалу окуляра на  $90^\circ$  и повторно выполните измерения размеров шарика  $d_y$ . Занесите результаты измерений в таблицу.

4. Определите средний диаметр шарика. Умножив измеренный диаметр, выраженный в делениях шкалы, на цену деления окулярного микрометра  $s$ , получите тем самым значение диаметра в миллиметрах. (Цена деления окулярного микрометра  $s = 0,016 \text{ мм}$ ).

5. Измерьте расстояние  $l$  между отметками на цилиндре вискозиметра.

6. Опустите шарик в исследуемую жидкость как можно ближе к оси цилиндра. Измерьте время  $t$  опускания шарика от верхней метки до нижней. (При измерении глаз наблюдателя должен находиться на уровне метки, таким образом, чтобы её противоположные стороны сливались в одну линию).

7. По формуле (2.9) вычислите коэффициент динамической вязкости.

8. Повторите опыт три раза.

9. Сравните полученное значение  $\eta$  со справочным значением коэффициента вязкости и сделайте вывод о применимости метода Стокса.

10. Вычислите коэффициент кинематической вязкости по формуле (2.3).

11. По формуле (2.4) определите текучесть исследуемой жидкости и сравните её с текучестью других жидкостей.

## Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение стационарного, ламинарного и турбулентного режима течения жидкости.

2. Сформулируйте понятие вязкости жидкости. Что такое динамическая, кинематическая и условная вязкости. Определите их размерности.

3. Поясните смысл градиента скорости. Сформулируйте закон Ньютона для ламинарного течения жидкости.

4. Сформулируйте закон Стокса.

5. Поясните суть метода Стокса для определения коэффициента динамической вязкости. Получите расчетную формулу.

6. От каких факторов зависит коэффициент вязкости жидкостей?

## Лабораторная работа 3

### Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом отрыва проволочного контура

#### Цель работы:

- 1) определить коэффициент поверхностного натяжения жидкости методом отрыва проволочного контура;
- 2) исследовать влияние на поверхностное натяжение жидкости температуры, поверхностно-активных веществ, концентрации раствора (по заданию преподавателя).

**Приборы и принадлежности:** динамометр ДПН, линейные проволочные контуры разных размеров, чаша для жидкости, термометр, электроплитка, исследуемые жидкости.

#### Теоретические сведения по теме

Поверхность жидкости, соприкасающейся с другой средой, например, с ее собственным паром, находится в особых условиях по сравнению с остальной жидкостью. Внутри однородной жидкости молекулы окружены со всех сторон точно такими же молекулами. Силы взаимодействия между ними одинаковы и направлены в противоположные стороны. При большом количестве взаимодействующих молекул силы друг друга компенсируют, а равнодействующая всех сил, действующая на определенную молекулу, равна нулю. Молекулы поверхностного слоя взаимодействуют не только с такими же молекулами, но и с молекулами приграничной среды, которая может отличаться от жидкости природой и плотностью частиц. В таком случае силы, действующие на каждую молекулу поверхностного слоя, оказываются неуравновешенными. Если жидкость граничит с любым газом малого давления, то результирующая сила, действующая на молекулы поверхностного слоя, направлена внутрь жидкости и поверхность прогибается. При этом увеличивается площадь поверхности жидкости. При увеличении площади поверхности увеличивается расстояние между молекулами и возникают «упругие» силы, препятствующие увеличению поверхности жидкости и не дающие им разойтись на расстояние, большее расстояний, характерных для жидкостей. В результате чего возникает напряженное состояние

поверхностного слоя, которое называется поверхностным натяжением. При перемещении молекулы внутрь жидкости или в сторону окружающей данную жидкость среды этой молекулой совершается работа  $A$ . Чтобы совершить работу, молекулы должны обладать некоторой избыточной энергией. По определению, энергия является величиной, характеризующей способность тела совершать работу. Поэтому молекулы поверхностного слоя жидкости обладают избыточной энергией по сравнению с молекулами, находящимися внутри жидкости. Эту энергию называют «свободной».

Измерение любой величины – это процесс сравнения этой величины с некоторой величиной, принятой за единицу. Поверхностное натяжение количественно можно характеризовать свободной энергией поверхностного слоя или работой, которую совершают молекулы поверхности жидкости при увеличении площади на величину  $\Delta S$ ; или силой поверхностного натяжения.

Работа  $A$ , совершаемая молекулами при изменении площади поверхности на величину  $\Delta S$ , при постоянной температуре пропорциональна изменению площади поверхности жидкости:

$$A = \sigma \cdot \Delta S . \quad (3.1)$$

Коэффициент пропорциональности  $\sigma$  характеризует работу, которую необходимо совершить для увеличения площади поверхности жидкости при постоянной температуре на единицу, и называется коэффициентом поверхностного натяжения:

$$\sigma = \frac{A}{\Delta S} . \quad (3.2)$$

В СИ коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma$  измеряется в Дж/м<sup>2</sup>. Поскольку изменение площади происходит неравномерно, то выражения (3.1) и (3.2) записывают в дифференциальной форме:

$$dA = \sigma \cdot dS , \quad (3.3)$$

$$\sigma = \frac{dA}{dS} . \quad (3.4)$$

Поверхность жидкости площадью  $S$  обладает «свободной энергией», которая может быть затрачена на совершение работы молекулами при изменении площади поверхности. Величина «свободной» энергии пропорциональна площади поверхности

$$\Delta U = \sigma \cdot \Delta S$$

отсюда

$$\sigma = \frac{\Delta U}{\Delta S}. \quad (3.5)$$

Таким образом, коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma$  можно определить также как свободную энергию единицы площади этой поверхности.

Если поверхность ограничена периметром смачивания длиной  $l$ , то коэффициент поверхности натяжения  $\sigma$  можно рассматривать как силу поверхностного натяжения  $F$ , действующую на единицу длины периметра смачивания и направленную перпендикулярно этому периметру:

$$\sigma = \frac{F}{l}. \quad (3.6)$$

Данная формула справедлива только в том случае, если сила постоянна по величине и направлению по всей длине контура. В случае невыполнения этого условия силу дифференцируют по длине, т. е. делят контур на столь малые участки, чтобы на каждом участке  $dl$  можно было считать силу постоянной. Тогда  $\sigma = \frac{dF}{dl}$ . Определённый таким образом коэффициент поверхностного натяжения в СИ измеряется в Н/м, что не противоречит выше названной единице измерения, выведенной из формул (3.2) и (3.3), т. к.

$$1 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} = 1 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}^2} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

Коэффициент поверхностного натяжения зависит от химического состава жидкости; свойств среды, с которой жидкость граничит; наличия и количества добавок и примесей; концентрации растворов; внешних условий (температуры и давления) и не зависит от размера поверхности жидкости. При наличии в жидкости других веществ изменяются межмолекулярные силы. Вещества, уменьшающие коэффициент поверхностного натяжения (мыло, жирные кислоты, спирты) называют поверхностно-активными. К поверхностно-активным веществам относятся органические соединения с ассиметричной молекулярной структурой, молекулы которых содержат атомные группы, резко различающиеся характером взаимодействия с окружающей средой. При увеличении температуры усиливается интенсивность хаотического движения молекул жидкости, что приводит к ослаблению межмолекулярного взаимодействия, в результате чего коэффициент поверхностного натяжения уменьшается.

## Подготовка и проведение измерений

**Упражнение 1.** *Определение коэффициента поверхностного натяжения для контуров различных размеров*

На рисунке 3.1 представлено оборудование, используемое при выполнении работы.



Рисунок 3.1 – Установка для определения коэффициента поверхностного натяжения методом отрыва проволочного контура

1. В чашу налейте дистиллированную воду. На крючок динамометра осторожно подвесьте проволочный контур заданной длины (длина контура задается преподавателем).

2. Перемещая динамометр по высоте штатива, проволочный контур с помощью пинцета погрузите в жидкость так, чтобы плечики контура были покрыты водой. Медленно выкручивайте винт держателя до тех пор, пока не разорвется пленка жидкости, тянущаяся за контуром. Запишите по шкале динамометра показание стрелки на пружинке динамометра, при котором разорвалась плёнка.

3. Опыт повторите 3 раза. Определите среднее арифметическое значение измеренной силы.

4. Вычислите коэффициент поверхностного натяжения жидкости по формуле:

$$\sigma = \frac{\bar{F}}{2l}, \quad (3.7)$$

где  $\bar{F}$  – средняя сила, приложенная для разрыва плёнки и измеренная с помощью динамометра;

$l$  – длина проволочного контура.

5. Повторите измерения и вычисления с контурами другой длины.

6. Результаты вычислений и измерений занесите в таблицу 3.1. Сравните их со справочными значениями.

7. Сделайте вывод о зависимости коэффициента поверхностного натяжения от длины контура.

Таблица 3.1 – Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости для контуров различной длины

№ п/п	Исследуемая жидкость	$l, мм$	$F_i, мН$	$\bar{F}, мН$	$\bar{\sigma}, Н/м$
1	Дистиллированная вода				
2					
3					
...					

### Упражнение 2. Зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры

1. Нагрейте дистиллированную воду до 60 °С и налейте ее в чашу для исследуемой жидкости.

2. Для контура с длиной, заданной преподавателем, измерьте силу  $F_i$  разрыва плёнки по мере охлаждения жидкости до комнатной температуры с интервалом 10 °С.

3. Рассчитайте коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma$  по формуле (3.7) для каждого значения температуры  $t$ . Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 3.2.

4. Постройте график зависимости  $\sigma = f(t \text{ } ^\circ\text{C})$  коэффициента поверхностного натяжения от температуры.

5. Сделайте вывод о характере полученной зависимости.

Таблица 3.2 – Зависимость коэффициента поверхностного натяжения воды от температуры

№ п/п	Исследуемая жидкость	$l, мм$	$t, ^\circ\text{C}$	$F_i, мН$	$\bar{F}, мН$	$\bar{\sigma}, Н/м$
1	Дистиллированная вода					
2						
3						
...						

**Упражнение 3.** *Зависимость коэффициента поверхностного натяжения от концентрации растворимых добавок*

1. На поверхность дистиллированной воды капните несколько капель поверхностно-активного вещества.
2. Определите силу поверхностного натяжения полученного раствора.
3. Вычислите коэффициент поверхностного натяжения для жидкости с поверхностно-активным веществом. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Зависимость коэффициента поверхностного натяжения от концентрации раствора

№ п/п	Исследуемая жидкость	$l$ , мм	$F_i$ , мН	$\bar{F}$ , мН	$\bar{\sigma}$ , Н/м
1	Раствор спирта				
2					
3					
...					

4. Добавьте в раствор ещё 5 капель поверхностно-активного вещества и снова выполните измерения силы поверхностного натяжения.
5. Повторите измерения и вычисления, добавляя поверхностно-активное вещество несколько раз по указанию преподавателя. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 3.3.
6. Постройте график зависимости коэффициента поверхностного натяжения от концентрации раствора  $\sigma = f(c)$ .
7. На основании полученных результатов сделайте вывод о зависимости коэффициента поверхностного натяжения от концентрации раствора.

**Упражнение 4.** *Влияние мыла и спирта на поверхностное натяжение воды*

1. Измерьте силу поверхностного натяжения мыльного раствора, действующую на контур указанной преподавателем длины.
2. Вычислите коэффициент поверхностного натяжения для заданной жидкости. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 3.4.
3. Повторите измерения и вычисления согласно пунктам 1 и 2 для спиртового раствора. Полученные значения занесите в таблицу 3.4.
4. Сравните измеренные значения коэффициентов поверхностного натяжения дистиллированной воды, мыльного и спиртового растворов.

5. Сделайте вывод о том, являются ли спирт и мыло поверхностно-активными веществами.

Таблица 3.4 – Влияние вводимых веществ на поверхностное натяжение воды

№ п/п	Исследуемая жидкость	$l$ , мм	Количество добавок	$F_i$ , мН	$\bar{F}$ , мН	$\bar{\sigma}$ , Н/м
<b>Мыльный раствор</b>						
1	Дистиллированная вода		+10 капель			
2			+20 капель			
3			+25 капель			
3			+30 капель			
<b>Спирт</b>						
1	Дистиллированная вода		10 капель			
2			+20 капель			
3			+25 капель			
3			+30 капель			

### Вопросы для самоконтроля

1. Что называется поверхностным натяжением?
2. Какова природа силы поверхностного натяжения?
3. Дайте определение коэффициента поверхностного натяжения.

Получите размерность коэффициента поверхностного натяжения.

4. Какая энергия называется «свободной» энергией поверхности жидкости?
5. Какие вещества называются поверхностно-активными?
6. От чего зависит величина коэффициента поверхностного натяжения?

# Лабораторная работа 4

## Определение влажности воздуха

### Цель работы:

- 1) научиться определять влажность воздуха при помощи психрометров Августа и Ассмана;
- 2) рассчитать основные физические параметры микроклимата воздушной среды помещения учебной лаборатории.

**Приборы и принадлежности:** психрометр Августа, психрометр Ассмана, пипетка с водой, психрометрическая таблица, таблица давления насыщенных водяных паров, волосной гигрометр, баротермогигрометр.

### Теоретические сведения

Основные физические параметры микроклимата помещения – это температура и влажность воздуха в помещении. Их значения регламентированы в зависимости от назначения помещения в соответствии с санитарно-гигиеническими требованиями.

В воздухе практически всегда имеется некоторое количество водяного пара. Давление воздуха складывается из парциальных давлений сухого воздуха  $P_{с.в.}$  и паров воды  $P_n$ :

$$P_{атм} = P_{с.в.} + P_n . \quad (4.1)$$

Парциальное давление водяного пара – это давление, которое производил бы водяной пар, если бы все остальные газы отсутствовали. Обычно при комнатных температурах (18–20 °С)  $P_n \ll P_{с.в.}$ , поэтому часто считается  $P_{атм} \approx P_{с.в.}$ .

Содержание водяного пара в воздухе, т. е. его влажность, характеризуется следующими параметрами: абсолютной, относительной, максимальной влажностью и точкой росы.

Абсолютной влажностью  $e$  называется величина, равная массе водяного пара, содержащегося в 1 м<sup>3</sup> воздуха. Обычно ее выражают в г/см<sup>3</sup>. Иначе говоря, абсолютная влажность – это плотность водяного пара, находящегося в воздухе при данных условиях. Считая, что водяной пар ведет себя подобно идеальному газу, на основании уравнения Менделеева – Клапейрона

$$PV = \frac{m}{\mu}RT \quad (4.2)$$

получим:

$$P = \frac{m}{V} \frac{RT}{\mu} \quad \text{или} \quad P = \rho \frac{RT}{\mu}, \quad (4.3)$$

т. к. плотность пара  $\rho = \frac{m}{V}$ ,

где  $P$  – давление пара;

$\mu$  – молярная масса пара;

$T$  – абсолютная температура;

$R$  – универсальная газовая постоянная.

Так как  $R$ ,  $T$  и  $\mu$  – величины постоянные, то давление водяного пара пропорционально его плотности. Давление практически легче измерить, чем плотность пара, находящегося в воздухе, поэтому влажность определяют также через парциальное давление водяного пара и выражают ее в миллиметрах ртутного столба или паскалях и называют абсолютной влажностью или упругостью. Для каждой температуры существует определенное максимальное значение абсолютной влажности, равное упругости насыщенного водяного пара при заданной температуре. Влажность, характеризующая насыщенный пар, называется максимальной. Ощущение сухости или сырости воздуха связано не с абсолютной влажностью, а с относительной.

Под относительной влажностью понимают отношение абсолютной влажности к ее максимальному значению при данной температуре. Она показывает, какую часть составляет абсолютная влажность от максимальной. Относительную влажность обычно выражают в процентах. Если обозначить относительную влажность через  $f$ , абсолютную влажность через  $e$ , а максимальную влажность при той же температуре через  $E$ , то

$$f = \frac{e}{E} \cdot 100 \% . \quad (4.4)$$

В этом случае она показывает, сколько процентов составляет абсолютная влажность от максимальной. На основании формулы (4.3), полученной из уравнения Менделеева – Клайперона (4.2), следует, что отношение давлений равно отношению плотностей

$$\frac{p}{p_0} = \frac{\rho}{\rho_0} . \quad (4.5)$$

Следовательно, относительную влажность можно определить и через давление, и через плотность:

$$f = \frac{e}{E} \cdot 100 \% = \frac{p}{p_0} \cdot 100 \% = \frac{\rho}{\rho_0} \cdot 100 \% . \quad (4.6)$$

Разность между максимальной влажностью  $E$  и абсолютной влажностью  $e$  водяного пара, фактически имеющегося в воздухе при той же температуре, называется *дефицитом влажности*  $D$ :

$$D = E - e . \quad (4.7)$$

Точкой росы называется температура, при которой водяной пар, имеющийся в воздухе, становится насыщенным. Точка росы характеризует начало конденсации водяного пара.

Для определения влажности воздуха служат гигрометры и психрометры. Существует несколько типов гигрометров, действие которых основано на различных принципах: весовой, волосной, пленочный и пр. В основе принципа работы всех гигрометров лежит зависимость тех или иных свойств или параметров прибора от влажности.

Действие волосного гигрометра основано на свойстве обезжиренного волоса изменять свою длину при изменении влажности воздуха, что позволяет измерять относительную влажность от 30 % до 100 % . Волос натянут на металлическую рамку. Изменение длины волоса передается стрелке, перемещающейся вдоль шкалы (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Волосной гигрометр М-68

Пленочный гигрометр имеет чувствительный элемент из органической пленки, которая растягивается при повышении влажности и сжимается при ее понижении. Изменение положения центра пленочной

мембраны передается стрелке. Волосной и пленочный гигрометры в зимнее время являются основными приборами для измерения влажности воздуха. Показания волосного и пленочного гигрометров периодически сравниваются с показаниями более точного прибора – психрометра.

Весовой гигрометр состоит из системы U-образных трубок, наполненных гигроскопическим веществом, способным поглощать влагу из воздуха. Через эту систему насосом протягивают некоторое количество воздуха, влажность которого определяют. Зная массу системы до и после измерения, а также объем пропущенного воздуха, находят абсолютную влажность.

Психометрический метод определения влажности основан на зависимости скорости испарения воды от влажности окружающего воздуха.

Разность температур двух термометров является мерой относительной влажности. Относительная влажность – это количество влаги, находящейся в воздухе относительно максимально возможного количества при данной температуре. Простейший комнатный психрометр состоит из двух спиртовых термометров, один из которых имеет устройство увлажнения. Благодаря протекающему воздушному потоку и, вследствие этого испарения, поверхность увлажненного термодатчика охлаждается. Одновременно измеряется температура окружающего воздуха, с помощью второго термодатчика (температура сухого термометра). В конструкцию прибора обычно включается таблица для чтения показаний, позволяющая, зная температуру каждого из термометров, найти относительную влажность. Психометры можно разделить на три категории: стационарные, аспирационные и дистанционные. В стационарных психрометрах термометры закреплены на специальном штативе в метеорологической будке. Основным недостатком стационарных психрометров – зависимость показаний увлажненного термометра от скорости воздушного потока, циркулирующего в будке. В аспирационном психрометре (например, психрометр Ассмана) термометры расположены в специальной оправе, защищающей их от повреждений и теплового излучения окружающей среды. Термометры обдуваются с помощью аспиратора (вентилятора) потоком исследуемого воздуха, движущегося с постоянной скоростью около 2 м/с. При положительной температуре воздуха аспирационный психрометр – наиболее надежный прибор для измерения температуры и влажности воздуха. В дистанционных психрометрах используются термосопротивления (терморезисторы).

В исследовательских лабораториях наиболее часто используются психометры Августа и Ассмана.

## Определение влажности воздуха при помощи психрометра Августа

Психрометр Августа состоит из двух термометров: сухого и влажного (рисунок 4.2). Шарик одного из термометров окутан кусочком батиста или марли. Сухой термометр показывает температуру окружающего воздуха  $t_1$  °С, а влажный – температуру  $t_2$  °С, зависящую от влажности окружающего воздуха. Разность  $t_1$  °С –  $t_2$  °С тем больше, чем меньше относительная влажность воздуха.



Рисунок 4.2 – Психрометр Августа

### Порядок выполнения работы

1. Смочите дистиллированной водой ткань, которой обернут один из термометров психрометра.
2. Когда показание влажного термометра установится (5–7 мин), запишите показания сухого  $t_1$  °С и влажного  $t_2$  °С термометров.
3. Определите разность показаний сухого и влажного термометров ( $t_1$  °С –  $t_2$  °С). По психрометрической таблице психрометра в верхней строчке найдите полученную разность температур. Проведите вертикаль, соответствующую разности температур. В крайнем левом столбике найдите значение сухого термометра  $t_1$  °С и посмотрите горизонтальную строчку, соответствующую температуре  $t_1$  °С. На пересечении этих строки и столбца указано значение относительной влажности воздуха, выраженное в процентах.

4. По таблице «Давление и плотность насыщенных водяных паров» определите максимальную влажность, соответствующую показанию сухого термометра. Вычислите по формулам (4.4) и (4.7) абсолютную влажность  $e$  и дефицит влажности  $D$ .

5. По баротермогигрометру измерьте атмосферное давление  $H$  и определите относительную влажность воздуха  $f$ .

6. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 4.1

## Определение влажности воздуха психрометром Ассмана

Психрометр Ассмана (рисунок 4.3) отличается по конструкции от психрометра Августа тем, что концы термометров помещены внутри открытых металлических трубок. Постоянство скорости обтекания воздухом резервуара сухого и влажного термометров достигается с помощью вентилятора, вмонтированного в конструкцию прибора.



Рисунок 4. 3 – Психрометр Ассмана

### Порядок выполнения работы

1. Смочите водой батист (можно марлю), поместите его внутрь правой трубки так, чтобы он касался шарика термометра.

2. Включите вентилятор прибора.

3. Дождитесь, когда разность температур сухого и влажного термометров перестанет изменяться (7–10 минут).

Таблица 4.1 – Определение влажности воздуха при помощи психрометров Августа и Ассмана

Психрометры	Показания сухого термометра $t_1$ °С	Показания влажного термометра $t_2$ °С	Разность показаний сухого и влажного термометров ( $t_1$ °С – $t_2$ °С)	Относительная влажность $f$ , %	Максимальная влажность $E$ , г/м <sup>3</sup>	Абсолютная влажность $e$ , г/м <sup>3</sup>	Дефицит влажности $D = E - e$ , г/м <sup>3</sup>	Атмосферное давление $H$ , мм рт.ст.	Атмосферное давление $H$ , Па
Психрометр Августа									
Психрометр Ассмана									

4. Повторите все действия из упражнения 1 для психрометра Августа.
5. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 4.1. Сравните значения относительной влажности, полученные с использованием обоих психрометров.

## Определение влажности воздуха с помощью волосного гигрометра М-68 и баротермогигрометра

1. Запишите в таблицу значения относительной влажности, измеренные по приборам волосной гигрометр М-68 (рисунок 4.1) и баротермогигрометр (рисунок 4.4).
2. Сравните показания всех четырех приборов и обоснуйте причину разности значений, полученных с помощью различных приборов.



Рисунок 4.4 – Баротермогигрометр

## Вопросы для самоконтроля

1. Дайте понятия абсолютной, относительной и максимальной влажности; дефицита влажности; точки росы.
2. Как изменится разность показаний сухого и влажного термометров в психрометре при понижении температуры воздуха, если абсолютная влажность остается неизменной?
3. Оба термометра в психрометре показывают одинаковую температуру. Какова относительная влажность?
4. Сформулируйте и запишите закон Менделеева – Клапейрона.
5. Запишите закон Ньютона, позволяющий определить количество теплоты, поглощаемой телом при нагревании.
6. Какими параметрами определяется количество теплоты, необходимое для испарения некоторого количества воды с поверхности влажного термометра?

# Лабораторная работа 5

## Определение удельной теплоемкости твердых тел

### Цель работы:

- 1) изучить тепловые свойства твердых кристаллических тел;
- 2) определить удельную теплоёмкость твердых тел калориметрическим методом.

**Приборы и принадлежности:** калориметр, электрическая плитка, два стакана с водой, технические весы, исследуемые тела (стальной, латунный, алюминиевый цилиндры), термометр.

### Теоретические сведения

Различные вещества обладают неодинаковой способностью поглощать тепло, т. е. нагреваться при увеличении температуры. Количество теплоты, которое необходимо сообщить данному телу, чтобы повысить его температуру на один градус, называется теплоемкостью тела. Теплоемкость зависит от вещества, из которого состоит тело, и его массы. Теплоемкость единицы массы тела называется удельной. Теплоемкость одного моля вещества называется молярной теплоемкостью. Теплоемкости различных веществ сильно различаются между собой. Удельная теплоемкость слабо растет с увеличением температуры и сильно изменяется при фазовых превращениях. Так, удельная теплоемкость воды при 20 °С составляет 4200 Дж/кг · К, при 90 °С она равна только 4220 Дж/кг · К. Удельная теплоёмкость льда при температуре 0 °С в 2 раза меньше, чем у воды; теплоёмкость водяного пара при температуре 100 °С около 1500 Дж/кг · К. Теплоемкость также зависит от условий, при которых происходит изменение температуры тела. Если размеры тела не изменяются, то вся теплота идет на изменение внутренней энергии. В таком случае говорят о теплоемкости при постоянном объеме  $c_V$ . При постоянном внешнем давлении благодаря тепловому расширению совершается механическая работа против внешних сил, что требует дополнительного расхода тепла. Поэтому теплоемкость при постоянном давлении  $c_p$  всегда больше, чем  $c_V$ . Для идеальных газов

$$c_p - c_V = R, \quad (5.1)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная, равная 8,32 Дж/кг · К.

В твёрдых (кристаллических) телах тепловое движение атомов представляет собой их малые колебания вблизи определённых положений равновесия (узлов кристаллической решетки). Так как у твёрдых тел коэффициенты объемного расширения невелики, то молярные теплоемкости твердых тел при постоянном объеме  $(c_\mu)_V$  и при постоянном давлении  $(c_\mu)_P$  практически не различаются. Поэтому для твердых тел вводят только понятие молярной теплоемкости  $c_\mu$ , не указывая, при каких условиях она определяется.

В 1819 г. французскими учеными П. Дюлонгом и А. Пти на опыте было установлено, что **молярная теплоемкость всех химически простых кристаллических твердых тел приблизительно равна**

$$c = 3R \approx 25 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}. \quad (5.2)$$

Это утверждение носит название закона Дюлонга и Пти.

Удельная теплоемкость  $c$  и молярная теплоемкость  $c_\mu$  связаны между собой следующим соотношением

$$c_\mu = \mu c \quad \text{или} \quad c = \frac{c_\mu}{\mu}, \quad (5.3)$$

где  $\mu$  – молярная масса вещества. Она пределяется сложением атомных масс веществ, образующих молекулу исследуемого вещества.

Закон Дюлонга и Пти достаточно хорошо выполняется при комнатной температуре. Вблизи абсолютного нуля теплоёмкость всех тел стремится к нулю (третий закон термодинамики). Для характеристики способности тела поглощать тепло обычно измеряют  $c_p$ . Классический способ измерения теплоёмкости основан на применении уравнения теплового баланса. Тело, теплоёмкость которого  $c_m$  хотят измерить, нагревают до определённой температуры  $t_m$  и быстро, чтобы свести к минимуму потери тепла в окружающую среду, переносят его в калориметр, заполненный водой, теплоёмкости которых  $c_k$  и  $c_v$  известны, и имеют температуру  $t_n$ . Тепло  $Q_1$  от нагретого тела будет передаваться более холодной воде и калориметру до тех пор, пока не установится тепловое равновесие. При этом температура тела, воды и калориметра станет одинаковой. Эта температура  $t_p$  называется равновесной. При этом количество тепла  $Q_1$ , отданного телом, будет равно количеству тепла  $Q_2$ , полученного водой и калориметром от нагретого тела

$$Q_1 = Q_2.$$

Количество тепла, отданное телом, вычисляется по формуле:

$$Q_1 = c_m m_m (t_m - t_p),$$

где  $m_m$  – масса исследуемого тела.

При этом вода и калориметр получают количество тепла

$$Q_2 = c_в m_в (t_n - t_p) + c_к m_к (t_n - t_p) = (c_в m_в + c_к m_к)(t_n - t_p),$$

где  $m_в$  и  $m_к$  – соответственно массы воды и калориметра.

Пренебрегая потерей тепла в окружающую среду, составим уравнение теплового баланса, т. е. приравняем  $Q_1$  и  $Q_2$ .

$$c_m m_m (t_m - t_p) = (c_в m_в + c_к m_к)(t_n - t_p). \quad (5.4)$$

Из полученного равенства выразим удельную теплоемкость вещества исследуемого образца:

$$c_m = \frac{(m_в c_в + m_к c_к)(t_n - t_p)}{m_m (t_m - t_p)}. \quad (5.5)$$

Таким образом, для определения удельной теплоемкости  $c_m$  исследуемого образца необходимо знать удельные теплоемкости воды  $c_в$  и калориметра  $c_к$  (справочные данные), начальные температуры нагретого тела  $t_m$  и холодной воды с калориметром  $t_n$ , а также температуру  $t_p$ , соответствующую тепловому равновесию. Массу образца  $m_m$  и калориметра  $m_к$  определяют с помощью технических весов. Массу воды можно определить двумя способами: взвешиванием или вычислением через ее объем и плотность.

$$m = \rho V. \quad (5.6)$$

## Подготовка к работе и проведение измерений

На рисунке 5.1 представлено оборудование, используемое при выполнении работы.

1. С помощью технических весов определите массу исследуемого тела  $m_m$  и массу пустого стакана. Результаты измерений занесите в таблицу 5.1.

2. Налейте в стакан воды, чтобы вода полностью покрывала погруженный в неё образец. Поместите стакан с водой и образцом на плитку и нагрейте до кипения воды.

3. Измерьте температуру воды  $t_n$  в калориметре с точностью до 0,1 °С перед опусканием в нее нагретого образца. Определите массу сосуда с водой и поместите его в калориметр.



Рисунок 5.1 – Установка для определения удельной теплоёмкости твердых тел

4. Определите температуру кипения воды по формуле:

$$t_{\kappa} = 100^{\circ} + 0,0375(H - 760), \quad (5.7)$$

где  $H$  – атмосферное давление, в мм.рт.ст., соответствующее условию проведения эксперимента, которое определяют по барометру.

5. После нагрева образца быстро перенесите его в сосуд с холодной водой, находящийся в калориметре и накройте крышкой.

6. Опустите термометр в воду через отверстие в крышке и, осторожно помешивая воду, дождитесь, когда температура перестанет изменяться. Эта температура  $t_p$ , будет соответствовать условию теплового равновесия.

7. Пользуясь формулой (5.5), вычислите удельную теплоемкость исследуемого образца  $c_m$ .

8. Сравните полученное значение удельной теплоемкости образца со справочным значением (используйте таблицу справочных величин).

9. По указанию преподавателя проделайте те же испытания с другими образцами.

10. Сравните значения удельной теплоемкости различных образцов между собой и сделайте соответствующие выводы.

Таблица 5.1 – Определение удельной теплоёмкости твердых тел

Исследуемый образец	Масса тела $m_m, \text{кг}$	Масса сосуда $m_c, \text{кг}$	Масса воды $m_g, \text{кг}$	$t_{\text{н}}, ^{\circ}\text{C}$	$P_{\text{атм}}, \text{мм.рт.ст.}$	$t_{\text{кип}}, ^{\circ}\text{C}$	$t_p, ^{\circ}\text{C}$	$c, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$
Сталь								
Латунь								
Алюминий								

## Вопросы для самоконтроля

1. Какие свойства твердых тел характеризуют теплоемкость?
2. Назовите виды теплоемкостей, дайте им определения и запишите соотношение между ними.
3. Сформулируйте закон Дюлонга-Пти.
4. Сформулируйте и запишите выражение для количества теплоты, которое получает тело при нагревании.
5. Составьте уравнение теплового баланса для данного опыта.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

## Лабораторная работа 6

### Определение среднего коэффициента линейного расширения твердых тел

#### Цель работы:

- 1) изучить методы определения коэффициентов теплового расширения твёрдых тел;
- 2) определить коэффициент линейного расширения стержней.

**Приборы и принадлежности:** прибор для определения коэффициента линейного расширения твердых тел, исследуемые образцы, пробирки, термометр, штангенциркуль.

#### Теоретические сведения

При нагревании размеры тел увеличиваются, т. е. происходит их тепловое расширение. Причиной расширения твердых и жидких тел является возрастание амплитуды тепловых колебаний атомов. При абсолютно нулевой температуре атомы твердого тела располагаются в определенных положениях равновесия, и потенциальную энергию атомов в этих положениях считают равной нулю. С ростом температуры увеличивается амплитуда колебаний атомов около своих положений равновесия.

Количественно тепловое расширение тел характеризуется изобарным коэффициентом расширения

$$\beta = \frac{1}{V} \left( \frac{dV}{dT} \right),$$

где  $V$  – объем тела;

$T$  – его абсолютная температура.

При равномерном расширении однородных твёрдых тел

$$\beta = \frac{V_2 - V_1}{V_1(T_2 - T_1)},$$

где  $V_1$  и  $V_2$  – объёмы тела при температурах  $T_1$  и  $T_2$  соответственно ( $T_1 < T_2$ ).

При нагревании изменяются все размеры тел. Однако в некоторых случаях важно знать величину расширения только в одном направлении

(для проволоки или стержней), а изменением поперечных размеров их можно пренебречь. В этой связи говорят о линейном расширении тел.

Длина твёрдого тела при нагревании увеличивается пропорционально изменению его температуры:

$$l_2 = l_1 + l_1 \alpha \Delta T = l_1 (1 + \alpha \Delta T), \quad (6.1)$$

где  $l_2$  – конечная длина тела при температуре  $T_2$ ;

$l_1$  – начальная длина тела при температуре  $T_1$ ;

$\Delta T = T_2 - T_1$  – изменение температуры тела при нагревании;

$\alpha$  – коэффициент линейного расширения тела.

Изменение длины тела при нагревании  $\Delta l = l_2 - l_1$  называется его абсолютным удлинением. Оно показывает, на сколько изменилась длина тела при увеличении температуры на  $\Delta T$ .

Относительное удлинение  $\varepsilon$  показывает, какую долю от первоначальной длины составляет абсолютное удлинение  $\Delta l$ :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_1}. \quad (6.2)$$

Относительное удлинение обычно измеряют в процентах – в этом случае оно показывает, сколько процентов составляет абсолютное удлинение от первоначальной длины тела

$$\varepsilon \% = \frac{\Delta l}{l_1} \cdot 100 \% . \quad (6.3)$$

Для количественной оценки способности тела расширяться при нагревании вводят понятие коэффициента линейного расширения  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta T}, \quad (6.4)$$

где  $l_0$  – длина при  $0^\circ\text{C}$ .

Этот коэффициент численно равен относительному удлинению тела, находящегося при  $0^\circ\text{C}$ , при увеличении его температуры на  $1^\circ\text{C}$  (1К). Коэффициент линейного расширения зависит от природы вещества, и для большинства тел его величина находится в пределах  $10^{-5}$ – $10^{-6}$ . В пределах температурного интервала от  $0^\circ\text{C}$  до  $100^\circ\text{C}$  коэффициент линейного расширения  $\alpha$  слабо зависит от температуры. Поэтому в формуле (6.3) вместо длины  $l_0$  можно брать длину  $l_1$  при комнатной температуре, т. е.  $\alpha \approx \frac{\Delta l}{l_1 \Delta T}$ . Значения  $\alpha$  для различных тел и температур

испытаний приводятся в справочных таблицах. Для большинства веществ  $\alpha > 0$ , но существуют и исключения. Например, вода при нагревании от  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$  при атмосферном давлении сжимается, т. е. в этом случае  $\alpha$  отрицательно.

Зависимость  $\alpha$  от температуры наиболее сильно выражена у газов. Для идеального газа коэффициент линейного расширения обратно пропорционален температуре. У жидкостей температурная зависимость  $\alpha$  проявляется слабее. У многих веществ в твердом состоянии коэффициент линейного расширения мал, и его принимают постоянным в широком интервале температур.

Для анизотропных тел коэффициент объёмного расширения  $\beta$  выражают соотношением:

$$\beta = \alpha_x + \alpha_y + \alpha_z, \quad (6.5)$$

где  $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$  линейные коэффициенты теплового расширения тел вдоль кристаллических осей  $x, y, z$ . Для изотропных тел  $\alpha_x = \alpha_y = \alpha_z$ , то есть

$$\beta \approx 3\alpha_x.$$

Тепловое расширение тел необходимо учитывать при конструировании всех установок, приборов и машин, работающих в переменных температурных условиях.

При измерении коэффициентов расширения применяют следующие методы:

- метод непосредственного измерения длины твёрдого тела при повышении температуры (этот метод позволяет определить средний коэффициент линейного расширения  $\alpha$ );
- интерференционный метод позволяет очень точно измерить изменение длины тела при нагревании, а следовательно, и коэффициент линейного расширения  $\alpha$ ;
- метод динамометра служит для определения коэффициента  $\beta$  у тел неправильной геометрической формы;
- весовой метод, в котором определяют плотность твёрдого тела при различных температурах, а затем по результатам измерения находят коэффициент объёмного расширения  $\beta$ .

## **Подготовка к работе и проведение измерений**

Для испытаний используют установку, фотографическое изображение которой приведено ниже на рисунке 6.1.

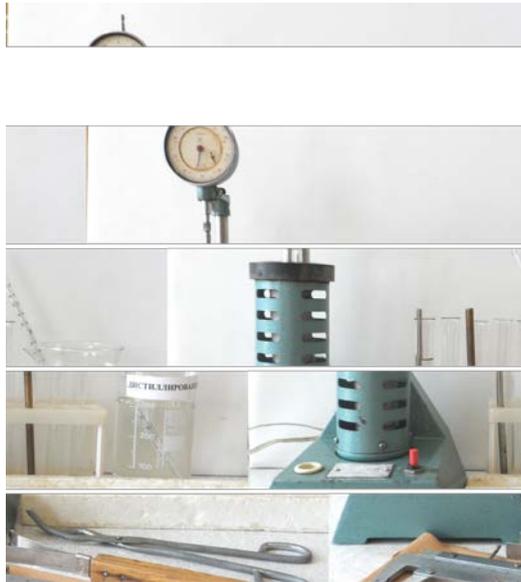


Рисунок 6.1 – Прибор для определения коэффициента линейного расширения твёрдых тел

### Порядок выполнения работы

1. Стеклообразную пробирку на 1/2 объема наполните водой. Термометром измерьте температуру воды в пробирке  $t_1$ . С помощью штангенциркуля определите длину стержня  $l_1$ . Индикатор установки отведите в сторону.

2. Пробирку с образцом поместите в прибор для нагревания. Плавно оттяните шток индикатора вверх и установите его в углубление на торце стержня. При работе с индикатором соблюдайте осторожность: не допускайте резких толчков штока индикатора и ударов стержнем о дно пробирки.

3. Поворотом шкалы индикатора совместите нуль его шкалы со стрелкой. Включите нагрев прибора. Через несколько минут (2–3 мин.) после начала кипения воды в пробирке по индикатору определите увеличение длины образца  $\Delta l$  (**Обратите внимание на цену деления шкалы индикатора**).

4. Температура стержня при измерениях соответствует температуре закипания воды и определяется по формуле:

$$t_2 = 100 \text{ }^\circ\text{C} + 0,0375(P - 760),$$

где  $P$  – атмосферное давление во время проведения опыта в мм.рт.ст. (определяется по барометру).

5. Повторите опыт 3 раза для каждого образца. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Определение коэффициента теплового расширения для материалов, из которых изготовлены стержни

Исследуемый материал	$t_1$ , °C	$l$ , мм	$\Delta l$ , мм	$P_{\text{атм}}$ , мм.рт.ст.	$t_2$ , °C	$\alpha$ , град <sup>-1</sup>
Сталь Алюминий Латунь						

### Вопросы для самоконтроля

1. Чем объясняется тепловое расширение твёрдых тел? Какими параметрами оно характеризуется?
2. Дайте определение абсолютного и относительного удлинения тел.
3. Что называется коэффициентом линейного расширения и от чего он зависит?
4. Что характеризует коэффициент объёмного расширения и каким соотношением он связан с коэффициентом линейного расширения в случае изотропных и анизотропных веществ?
5. Как определить изменения длины и объема тел при нагревании?

## Литература

- 1 Кикоин, А. К. Молекулярная физика / А. К. Кикоин, И. К. Кикоин. – М. : Наука, 1976. – 500 с.
- 2 Физический энциклопедический словарь / под ред. А. М. Прохорова. – М. : Советская энциклопедия, 1984 г. – 456 с.
- 3 Матвеев, А. Е. Молекулярная физика / А. Е. Матвеев. – М. : Наука, 1981. – 248 с.
- 4 Безденежных, Е. А. Физика / Е. А. Безденежных, А. Ф. Шевченко. – М. : Наука, 1978. – 176 с.
- 5 Савельев, И. В. Курс общей физики. Молекулярная физика / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1989. – 352 с.
- 5 Сивухин, Д. В. Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1983. – 552 с.

Производственно-практическое издание

**Кравченко** Ирина Петровна,  
**Лин** Дмитрий Григорьевич

**ОБЩАЯ ФИЗИКА:  
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА**

Практическое руководство  
для студентов специальностей  
1-31 03 01- 02 «Математика  
(научно-педагогическая деятельность)»  
и 1-40 01 01 «Программное обеспечение  
информационных технологий»

Редактор *В. И. Шкредова*  
Корректор *В. В. Калугина*

Подписано в печать 09.12.2014. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Ризография. Усл. печ. л. 2,6.  
Уч.-изд. л. 2,8. Тираж 25 экз. Заказ 687.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования  
«Гомельский государственный университет  
имени Франциска Скорины».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/87 от 18.11.2013.  
Специальное разрешение (лицензия) № 02330 / 450 от 18.12.2013.  
Ул. Советская, 104, 246019, г. Гомель.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

**И. П. Кравченко, Д. Г. Лин**

**ОБЩАЯ ФИЗИКА:  
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА**

Гомель 2014

