

**Областное государственное бюджетное профессиональное  
образовательное учреждение**

**«Рязанский строительный колледж»**



## **ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКЕ И ТЕРМОДИНАМИКЕ**

**Методические указания по выполнению  
лабораторных работ**

Рязань 2017

УДК 53  
ББК 22.3

Печатается по решению методического совета  
Рязанского строительного колледжа  
от 21.11.2017 г, протокол №4.

Рецензент: к.п.н., доцент РГУ И.А.Ильдяев

**Лабораторные работы по молекулярной физике и термодинамике.**  
Методические указания по выполнению лабораторных работ / Авторы-составители П.В. Абросимов, Е.В. Зенякина / Рязанский строительных колледж. – Рязань: ОГБПОУ РСК, 2017. - 49 с.

Методические указания предназначены для студентов всех форм обучения Рязанского строительного колледжа, выполняющих лабораторный практикум по курсу «Физика», раздел «Молекулярная физика и термодинамика».

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Введение</i> .....	4
1. Техника безопасности при работе в лабораториях физики и правила внутреннего распорядка .....	5
2. Лабораторная работа №2.1 «Изучение броуновского движения и определение постоянной Больцмана».....	7
3. Лабораторная работа №2.2 «Уравнение состояния идеального газа».....	14
4. Лабораторная работа №2.3 «Опытное подтверждение закона Гей-Люссака» .....	22
5. Лабораторная работа №2.4 «Определение удельной теплоты плавления льда» .....	28
6. Лабораторная работа №2.5 «Определение поверхностного натяжения жидкостей» .....	33
7. Оценка лабораторных работ по физике.....	46

## ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные занятия являются одной из ведущих форм учебной работы по физике. На этих занятиях студенты самостоятельно проводят физический эксперимент. При этом они изучают теоретические обоснования работы, проводят монтаж экспериментальной установки, планируют последовательность выполнения отдельных этапов работы, проводят наблюдения и измерения, а затем выполняют вычисления и делают вывод о проделанной работе.

*Особенностями лабораторных занятий по физике являются:*

- ✓ на занятиях в физической лаборатории студенты должны пользоваться не только учебными моделями приборов, но и современной аппаратурой, употребляющейся в настоящее время в передовой технике и научно-исследовательских лабораториях;
- ✓ в процессе лабораторных занятий студенты должны понять, что диалектический метод познания закономерностей физических процессов является единственным научным методом познания, что научные теории и представления отражают объективную реальность и что правильность этого отражения проверяется экспериментом или практикой;
- ✓ лабораторные занятия по физике развивают познавательные способности студентов, их наблюдательность, мышление, память, воображение, внимание;
- ✓ измерения физических величин должны производиться наиболее совершенными приборами, которые употребляются в настоящее время в научных учреждениях и промышленности;
- ✓ лабораторные занятия по физике способствуют развитию у студентов навыков производства вычислительных операций, в том числе и с помощью современных электронно-вычислительных машин (персональных компьютеров);
- ✓ физический практикум организуется так, что студенты получают, возможно, больше навыков в самостоятельной работе, как в экспериментальной части, так и при усвоении теоретического материала.

## ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ В ЛАБОРАТОРИЯХ ФИЗИКИ И ПРАВИЛА ВНУТРЕННЕГО РАСПОРЯДКА

Выполнение основных правил работы в лабораториях физики обязательно для всех студентов. Эти правила обеспечивают личную безопасность студентов, а также сохранность приборов и оборудования. Все студенты должны быть ознакомлены на первом занятии с этими правилами, после чего студенты и преподаватель, проводивший занятие, расписываются в книге учёта инструктажа по технике безопасности. Студенты, не прошедшие инструктаж, к работе в лабораториях не допускаются.

### Общие правила работы в физических лабораториях

1. Студенты находятся в лаборатории только в присутствии преподавателя или лаборанта. Входить в лабораторию и выходить из неё в часы занятий можно только с разрешения преподавателя.
2. Студенты допускаются к выполнению лабораторных работ только с разрешения преподавателя. До этого студент имеет право внешне ознакомиться с приборами, но включать их и приводить в действие *категорически* запрещается.
3. Студентам запрещается включать общие выключатели (рубильники) на аудиторных щитах.
4. Запрещается трогать приборы, не относящиеся к выполняемой работе, а также использовать приборы с других установок. В случае отсутствия нужного прибора обращаться следует к преподавателю или лаборанту.
5. Запрещается поворачивать какие-либо рукоятки или винты, нажимать кнопки и т.д., назначение которых неизвестно студенту.
6. Запрещается оставлять, даже на короткое время, включенную установку. В случае необходимости отойти, необходимо выключить установку.
7. В случае невыполнения пунктов 3-6 ремонт прибора или покупка производится полностью за счёт студента.

8. На рабочем столе, кроме необходимых приборов, могут находиться: методическое руководство по выполнению лабораторной работы, рабочая тетрадь, ручка, карандаш, линейка, микрокалькулятор. После работы необходимо убрать своё рабочее место.
9. В лабораториях необходимо соблюдать чистоту. Категорически запрещается находиться в лабораториях в верхней одежде.
10. Работа в лаборатории требует большого внимания и аккуратности ко всем выполняемым операциям. Во время работы старайтесь не ходить без необходимости по лаборатории.
11. Студенты, пропустившие лабораторное занятие, должны отработать его в часы свободные от занятий под руководством преподавателя или лаборанта. При этом полученные данные заверяются подписью преподавателя, проводящего занятие.
12. О любой замеченной неисправности или неполадке студент должен немедленно сообщить преподавателю или лаборанту.
13. Собранную электрическую схему нельзя подключать к источнику тока до проверки её преподавателем или лаборантом.
14. После проведения измерений цепь обязательно размыкается. После выполнения работы и одобрения полученных результатов преподавателем студент приводит своё рабочее место в состояние, которое оно имело до начала работы.

## Лабораторная работа № 2.1

### ИЗУЧЕНИЕ БРОУНОВСКОГО ДВИЖЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ БОЛЬЦМАНА

Цель работы: изучение броуновского движения и определение постоянной Больцмана по пробегу броуновской частицы.

Приборы и принадлежности: сосуд с малыми частицами, взвешенными в газе, микроскоп, секундомер, термометр, средства измерения положения частицы.

#### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

**Броуновское движение** – беспорядочные движения любых малых частиц, взвешенных в жидкости или газе. Причиной броуновского движения являются многочисленные случайные соударения молекул окружающей среды с частицей. Такое движение было исследовано в 1827 г. английским ботаником Робертом Броуном (1773-1858), который наблюдал в микроскоп движение цветочной пыльцы, взвешенной в воде. Взвешенные малые частицы совершают независимые неупорядоченные движения, при этом траектории частиц являются зигзагообразными и запутанными. Интенсивность броуновского движения не зависит от времени, но возрастает с ростом температуры среды, а также при уменьшении вязкости среды и при уменьшении размеров частиц. При этом химическая природа частиц не имеет значения.

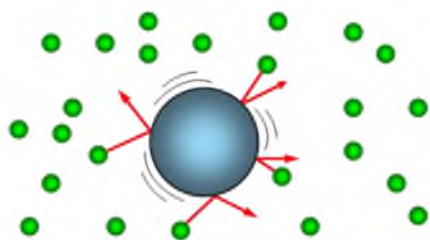


Рис. 1

Сразу после своего открытия, броуновское движение не получило удовлетворительного объяснения. Лишь во второй половине XIX века его стали связывать с ударами молекул жидкости о поверхность взвешенных в жидкости малых частиц (рис. 1).

Несмотря на кажущийся полный беспорядок, случайные перемещения броуновских частиц оказалось все же возможным описать математической зависимостью. Впервые строгое объяснение броуновского движения дали в

1905 г польский физик Марианн Смолуховский и немецкий физик Альберт Эйнштейн. Эйнштейн впервые осознал, что это таинственное, на первый взгляд, явление служит наилучшим экспериментальным подтверждением правоты атомной теории строения вещества. Он объяснил его примерно так: взвешенная в воде спора подвергается постоянной «бомбардировке» со стороны хаотично движущихся молекул воды. В среднем, молекулы воздействуют на неё со всех сторон с равной интенсивностью и через равные промежутки времени. Однако, как бы ни мала была спора, в силу чисто случайных отклонений сначала она получает импульс от молекулы, ударившей её с одной стороны, затем – от молекулы, ударившей её с другой и т. д. В результате усреднения таких соударений получается, что в какой-то момент частица «дёргается» в одну сторону, затем, если с другой стороны её «толкнуло» больше молекул – в другую и т. д. Используя законы математической статистики и молекулярно-кинетической теории газов, Эйнштейн вывел уравнение, описывающее зависимость среднеквадратичного смещения броуновской частицы от макроскопических показателей:

$$\Delta \langle r^2 \rangle = \frac{kT}{3\pi\eta a}, \quad (1)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура среды;  $\eta$  – вязкость среды;  $a$  – радиус частицы.

Выражение (1) называется формулой Эйнштейна-Смолуховского. Формула Эйнштейна-Смолуховского говорит о том, что среднее значение квадрата смещения броуновской частицы за промежуток времени  $\Delta t$  вдоль оси  $x$  (или любой другой оси) пропорционально  $\Delta t$ . Формула (1) позволяет вычислять среднее значение квадрата перемещения, причём среднее берётся по всем частицам, рассматриваемым в опыте. Эта формула справедлива также и для одной частицы, совершающей хаотические движения.

Броуновское движение – наиболее наглядное экспериментальное подтверждение представлений молекулярно-кинетической теории.



В 1908 г. французский физик Жан Батист Перрен начал количественные наблюдения за движением броуновских частиц под микроскопом. Он использовал изобретённый в 1902 г. ультрамикроскоп, который позволял обнаруживать мельчайшие частицы благодаря рассеянию на них света от мощного бокового осветителя. Крошечные шарики почти сферической формы и примерно одинакового размера Перрен получал из гуммигута – сгущённого сока некоторых тропических деревьев (он используется и как жёлтая акварельная краска). Эти крошечные шарики размером около 1 мкм были взвешены в глицерине, содержащем 12% воды; вязкая жидкость препятствовала появлению в ней внутренних потоков, которые смазали бы картину. Вооружившись секундометром, Перрен отмечал и потом зарисовывал (в сильно увеличенном масштабе) на разграфлённом листе бумаги положение частиц через равные интервалы, например, через каждые полминуты. Соединяя полученные точки прямыми, он получал замысловатые траектории. Такое хаотичное, беспорядочное движение частиц приводит к тому, что перемещаются они в пространстве довольно медленно: сумма отрезков намного больше смещения частицы от первой точки до последней.

Используя теоретическую формулу (1) и свои результаты, Перрен получил точное для того времени значение числа Авогадро:  $6,8 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>. Перрен исследовал также с помощью микроскопа распределение броуновских частиц по вертикали и показал, что, несмотря на действие земного притяжения, они остаются в растворе во взвешенном состоянии.

Результаты, полученные Перреном, подтвердили теоретические выводы Эйнштейна. Это произвело сильное впечатление на научный мир. Как написал через много лет американский физик А.Пайс, «не перестаёшь удивляться этому результату, полученному таким простым способом: достаточно приготовить взвесь шариков, размер которых велик по сравнению с размером простых молекул, взять секундометр и микроскоп, и можно определить постоянную Авогадро!».

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В работе исследуется двумерное броуновское движение одной частицы при разных температурах. Общий вид окна приложения изображён на рис. 2. На экране приложения представлено круглое поле микроскопа с броуновской частицей, совершающей хаотическое движение. Координатная сетка даёт возможность следить за изменением положения частицы со временем. С использованием секундомера можно проводить измерения положения частицы через равные промежутки времени. При нажатии кнопки "Измерить", измеренное в текущий момент времени значение квадрата смещения частицы  $r^2$  отображается на графике приложения в виде точки. Полученные при проведении опыта результаты используются для определения значения постоянной Больцмана.

Для этого из формулы (1) выразим постоянную Больцмана, собрав константы в  $b = 0,15 \cdot 10^{-9}$  и введя угловой коэффициент  $K$ :

$$k = \frac{K \cdot b}{4T}. \quad (2)$$

Абсолютная температура  $T$  задаётся на установке (рис. 2), а угловой коэффициент  $K$  получаем из результатов проведённого опыта.

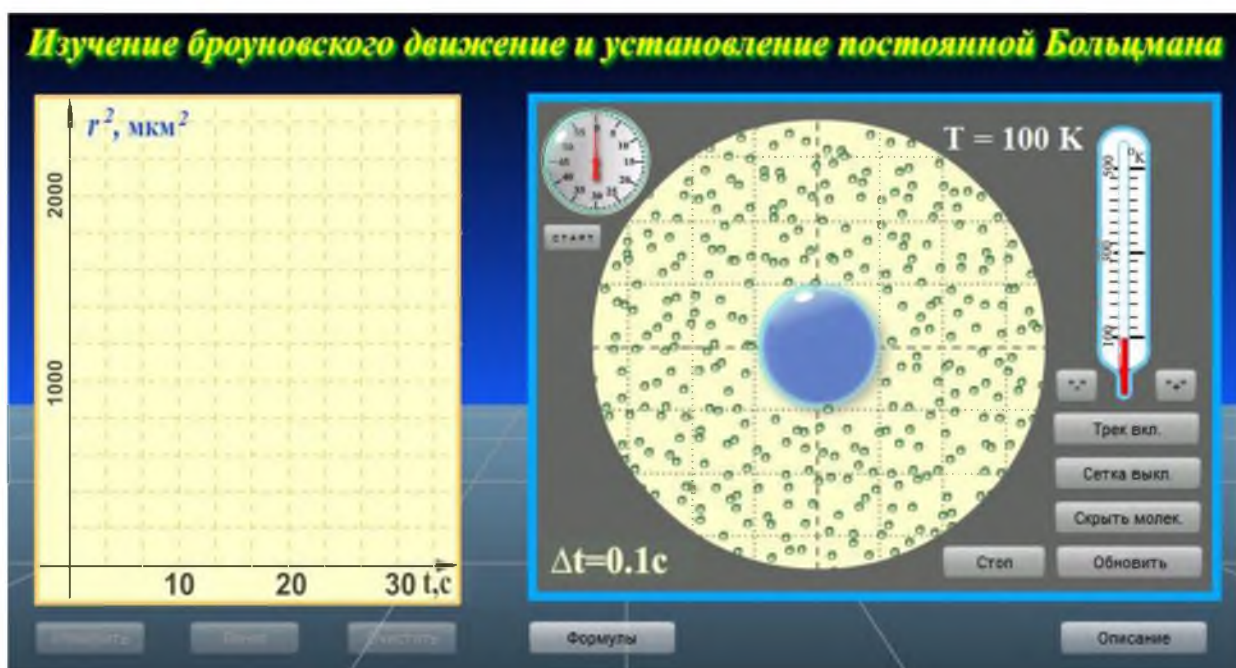


Рис. 2

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Запустите программу моделирования броуновского движения.
2. Кнопкой "Старт" включите секундомер.
3. Установите температуру  $T = 100$  К и нажмите на кнопку "Трек вкл." для отображения трека частицы.
4. Нажимая кнопку "Измерить" с интервалом 1с (или 2 с) по секундомеру, проведите измерения положения частицы до тех пор, пока точки будут отмечаться на графике.
5. Повторите 3 раза измерения п. 4, возвращая каждый раз частицу в начальное положение кнопкой "Обновить".
6. Для нахождения углового коэффициента  $K$  зависимости  $\langle r^2 \rangle \sim t$  нажмите на кнопку "Линия", при этом на графике появится отрезок, посредством которого будет выполняться линейная аппроксимация экспериментальных данных. Щёлкнув мышкой на крайних точках отрезка, и перемещая их мышью, наложите "наилучшим образом" отрезок прямой на экспериментальные точки. Запишите полученное значение коэффициента  $K$  в таблицу измерений (строка с  $T = 100$  К).
7. Установите значение температуры  $T = 300$  К и выждите некоторое время (8-10 с) пока "нагреется" броуновская частица.
8. Нажмите кнопку «Очистить» и повторите измерения п.п. 4-6.
9. Установите значение температуры  $T = 500$  К и выждите некоторое время (8-10 с) пока снова "нагреется" броуновская частица.
10. Нажмите кнопку «Очистить» и повторите измерения п.п. 4-6.

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Для каждого значения коэффициента  $K$  (температуры 100 К, 300 К и 500 К) вычислите значения постоянной Больцмана по формуле (2) и запишите в соответствующие ячейки таблицы измерений.

2. Вычислите среднее значение постоянной Больцмана по результатам опыта

$$\left( k_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^3 k_i}{3} \right) \text{ и запишите его в таблицу измерений.}$$

3. Оцените абсолютную погрешность измерения постоянной Больцмана по формуле:  $\Delta k = |k_{cp} - k_{теор}|$ , где  $k_{теор} = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.

4. Вычислите относительную погрешность измерения:  $\frac{\Delta k}{k_{cp}}, \%$

5. Полностью заполните таблицу измерений, занеся полученные погрешности в соответствующие ячейки.

6. Сделайте общий вывод по работе с указанием вычисленного значения постоянной Больцмана:

$$k = (k_{cp} \pm \Delta k) \frac{\text{Дж}}{\text{К}},$$

$$\frac{\Delta k}{k_{cp}} \approx \dots \% \text{ (округлите до целого числа!)}$$

Таблица измерений

№	T, К	K	k, Дж/К	k <sub>теор</sub> , Дж/К	Δk, Дж/К	$\frac{\Delta k}{k_{cp}}, \%$
1				1,38 · 10 <sup>-23</sup>		
2						
3						
Ср.	—	—				

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы основные положения молекулярно-кинетической теории?
2. Дайте определение броуновского движения. Объясните, почему оно наблюдается только в случае малых частиц.
3. Можно ли остановить броуновское движение частиц?

4. В какой (каких) среде (средах) можно наблюдать броуновское движение?
5. Как броуновское движение зависит от массы частицы? от температуры?
6. Опишите опыты Ж. Перрена. Какую роль они сыграли для обоснования молекулярно-кинетической теории?
7. В какой среде при одной и той же температуре броуновское движение происходит интенсивнее в капле воды или в капле масла? Почему?

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Физика для профессий и специальностей технического профиля: учебник для образоват. учреждений нач. и сред. проф. образования / В.Ф.Дмитриева. – 6-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2013. – 448 с.
2. Физика для профессий и специальностей технического профиля. Сборник задач: учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования / В.Ф.Дмитриева. – 4-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2014. – 256 с.

## Лабораторная работа № 2.2

### УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Цель работы: проверка справедливости законов Бойля-Мариотта и Шарля для идеального газа.

Приборы и принадлежности: сосуд с газом, термометр, манометр, средства измерения мгновенной величины давления газа на стенки сосуда.

#### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В молекулярно-кинетической теории рассматривается идеализированная модель реальных газов – модель **идеального газа**, согласно которой:

1. собственный объем молекул газа пренебрежимо мал по сравнению с объемом сосуда;
2. между молекулами газа отсутствуют силы взаимодействия;
3. столкновения молекул газа между собой и со стенками сосуда абсолютно упругие.

В условиях, близких к нормальным, реальные газы близки по своим свойствам к идеальному газу.

Давление газа возникает в результате ударов молекул о стенки сосуда, при этом каждая молекула передает стенке тот импульс, на который изменяется импульс самой молекулы в результате столкновения со стенкой. Кроме давления, состояние газа описывается ещё двумя параметрами – объемом и температурой. Аналитическое выражение, связывающее параметры состояния системы (давление, объем и температуру) представляет собой **уравнение состояния** идеального газа. Оно может быть записано в разных формах:

$$p = nkT, \quad (1)$$

где  $n$  – концентрация молекул;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура.

Учитывая, что концентрация молекул определяется через количество молекул  $N$  и объем газа  $V$  как  $n = N/V$ , то  $pV = NkT$ . Количество молекул  $N$ , в свою очередь, можно представить в виде произведения числа молей  $\nu$  на число

Авогадро  $N_A$ :  $N = \nu N_A$ . Тогда  $pV = \nu N_A kT = \nu RT$ , где  $R = N_A k = 8,31$  Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная, одинаковая для всех газов. Таким образом:

$$pV = \nu RT \quad (2)$$

или

$$pV = \frac{m}{M} RT, \quad (3)$$

где  $m$  – масса всего газа в сосуде, а  $M$  – его молярная масса.

Уравнения (1–3) являются разными формами записи уравнения состояния идеального газа.

Уравнение состояния, записанное в форме (3), называют **уравнением Клапейрона-Менделеева**. Уравнение Клапейрона-Менделеева описывает равновесные состояния идеального газа, а также любые обратимые процессы, которые в нем могут протекать. В форме  $pV = BT$ , где  $B$  – некоторая постоянная, зависящая от природы газа и его массы, уравнение было установлено опытным путём в 1834 г. в работах Б.П.Э. Клапейрона<sup>1</sup>. В современном виде оно было получено в 1874 г. Д.И. Менделеевым<sup>2</sup> в результате объединения законов Гей-Люссака, Бойля-Мариотта и Авогадро.

При наложении на систему дополнительных условий, из общего уравнения состояния идеального газа можно получить более частные уравнения изотермического, изобарического и изохорического процессов, в которых один из параметров ( $p$ ,  $V$  или  $T$ ) поддерживается *неизменным*. Такие процессы называют **изопроцессами**. Отметим, что законы, которые описывают изопроцессы, были открыты задолго до вывода уравнения состояния идеального газа.

---

<sup>1</sup> Бенуа́ Поль Эмиль Клапейро́н (1799-1864) – французский физик и инженер.

<sup>2</sup> Дми́трий Ива́нович Менделе́ев (1834-1907) – русский учёный-энциклопедист: химик, физикохимик, физик, метролог, экономист, технолог, геолог, метеоролог, нефтяник, педагог, преподаватель, воздухоплаватель, приборостроитель. Профессор Санкт-Петербургского университета; член-корреспондент по разряду «физический» Императорской Санкт-Петербургской Академии наук.

Существует *три* основных изопроцесса:

1. **Изотермический процесс** протекает в системе при постоянной температуре ( $T = const$ ). Уравнение процесса, как следует из (3), имеет вид:

$$pV = const, \quad (4)$$

т.е. для газа данной массы произведение давления и объёма остаётся постоянным, если температура газа не изменяется.

В изотермическом процессе давление газа обратно пропорционально его объёму. Данная зависимость была экспериментально получена во второй половине 17 века английским физиком Р. Бойлем<sup>3</sup>, а также французским физиком Э. Мариоттом<sup>4</sup>, и называется **законом Бойля-Мариотта**.

2. **Изобарный (изобарический) процесс** протекает в системе при постоянном давлении ( $p = const$ ):

$$\frac{V}{T} = const, \quad (5)$$

т.е. для газа данной массы отношение объёма газа к его температуре остаётся постоянным, если давление газа не изменяется.

Этот закон носит название **закона Гей-Люссака** (установлен Ж.Л. Гей-Люссаком<sup>5</sup> в 1802 г).

3. **Изохорный (изохорический) процесс** протекает в системе при постоянном объёме ( $V = const$ ):

$$\frac{p}{T} = const, \quad (6)$$

т.е. для газа данной массы отношение давления газа к его температуре остаётся постоянным, если объём газа не изменяется.

Этот закон называется **законом Шарля** (установлен Ж.А.С. Шарлем<sup>6</sup> в 1787 г).

---

<sup>3</sup> Роберт Бойль (1627-1691) – англо-ирландский натурфилософ, физик, химик и богослов.

<sup>4</sup> Эдм Мариотт (1620-1684) – аббат, французский физик XVII века.

<sup>5</sup> Жозеф Луи Гей-Люссак (1778-1850) – французский химик и физик, член Французской Академии наук (1806).

<sup>6</sup> Жак Александр Сезар Шарль (1746-1823) – французский изобретатель и учёный.



Графики изопроеессов изображены в координатах  $p, V$  на рис. 1. В «родных» координатах для двух значений величины – на рис. 2-4.

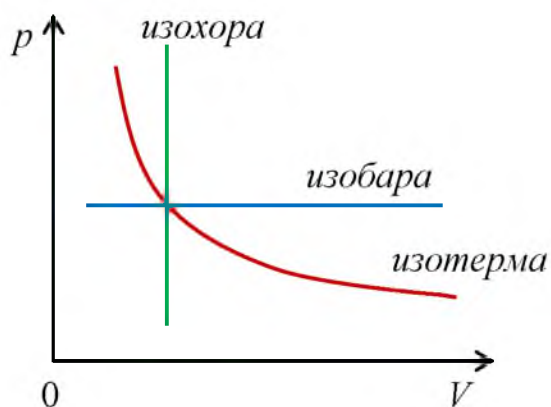


Рис. 1

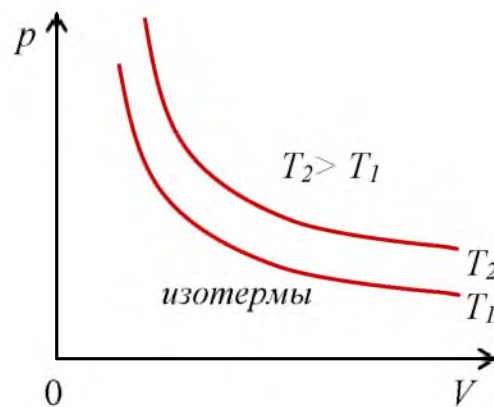


Рис. 2

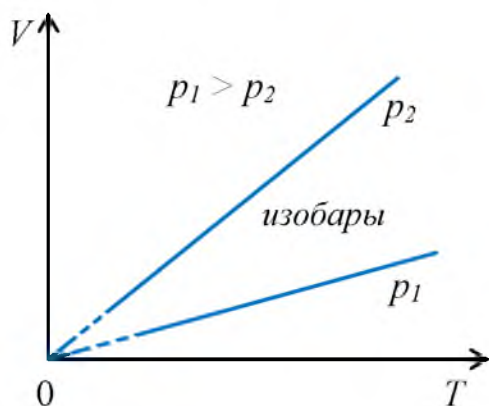


Рис. 3

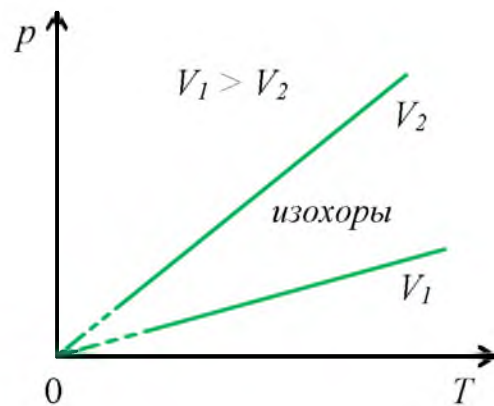


Рис. 4

Отметим, что законы Бойля-Мариотта, Гей-Люссака и Шарля справедливы для широкого интервала давлений, объёмов и температур. Тем не менее, при очень высоких давлениях, превышающих атмосферное в 300-400 раз, а также высоких температурах, в эксперименте наблюдаются отклонения от этих законов. Закон Гей-Люссака, как и закон Шарля, перестаёт соблюдаться в области низких температур, близких к температуре сжижения газов.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Общий вид приложения показан на рис. 5. В окне приложения представлен сосуд с перемещаемым поршнем, содержащий движущиеся частицы. Температура системы (в Кельвинах) измеряется с помощью соединённого с сосудом термометра. Температура может изменяться в сторону уменьшения и увеличения с помощью кнопок "-" и "+", расположенных справа от термометра. При нажатии кнопки "Пуск" объем сосуда заполняется движущимися частицами, имитирующими молекулы идеального газа. Столкновения многих частиц со стенками сосуда приводит к возникновению давления на его стенки. Величина давления (мгновенное значение) непрерывно регистрируется и отображается на графике в левой части окна приложения. Приложение позволяет проводить систематические исследование зависимости давления от температуры и объёма системы.

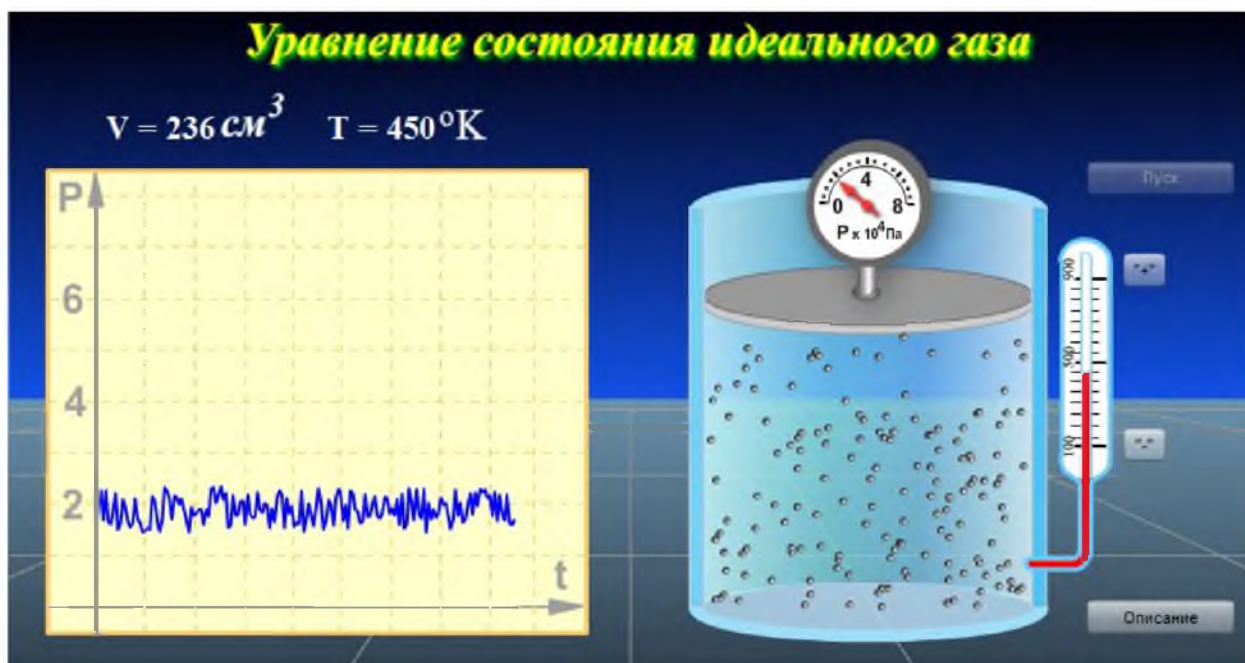


Рис. 5. Вид окна приложения

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Запустите приложение «Уравнение состояния идеального газа».
2. Кнопкой "Пуск" запустите движение молекул в сосуде.

3. С помощью кнопок "-" и "+", расположенных справа от термометра, установите температуру  $T_1$  (например, 700 К). Запишите это значение в таблицу 1.
4. Установите минимальный объём системы перемещая поршень мышкой вниз. Запишите значение этого объёма в таблицу 1.
5. По результатам измерения давления в зависимости от времени, отображаемым в виде графика, определите среднее значение давления для заданных значений  $(V, T_1)$ . Например, на рис.5 среднее значения давления будет  $2 \cdot 10^4$  Па. Запишите это значение в таблицу 1 для температуры  $T_1$ .
6. Выполните ещё 4 раза измерения давления, увеличивая объём системы с помощью перемещения поршня (мышкой). При этом температура  $T_1$  должна оставаться неизменной. Старайтесь увеличивать объём так, чтобы снимать значения давления было удобно (получались бы значения, близкие к целым числам).
7. Задайте другое значение температуры  $T_2$  (например, 300 К) и повторите измерения подобные п. 4-6 для новой температуры  $T_2$ . Полученные результаты занесите в таблицу 1, заполнив её до конца.
8. Установите произвольный объём  $V_1$  (например,  $190 \text{ см}^3$ ) системы перемещая поршень мышкой вниз. Запишите значение этого объёма в таблицу 2.
9. Выполните 5 раз измерения давления, изменяя температуру системы при фиксированном объёме. Полученные результаты занесите в таблицу 2.
10. Задайте другое значение объёма  $V_2$  (например,  $190 \text{ см}^3$ ) и повторите измерения п. 9. Полученные результаты занесите в таблицу 2.

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. По результатам ваших измерений постройте графики зависимостей  $p=f(V)$  и  $p=f(T)$ .

2. Сделайте общий вывод по работе с указанием согласуются ли полученные Вами результаты с выводами из законов Бойля-Мариотта и Шарля.

Таблица 1

№	$T_1 = \dots \text{ К}$		$T_2 = \dots \text{ К}$	
	$V, \text{ см}^3$	$p, 10^4 \text{ Па}$	$V, \text{ см}^3$	$p, 10^4 \text{ Па}$
1				
2				
3				
4				
5				

Таблица 2

№	$V_1 = \dots \text{ см}^3$		$V_2 = \dots \text{ см}^3$	
	$T, \text{ К}$	$p, 10^4 \text{ Па}$	$T, \text{ К}$	$p, 10^4 \text{ Па}$
1				
2				
3				
4				
5				

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называют идеальным газом? Можно ли применять законы, полученные для идеального газа, при описании свойств реальных газов?
2. Поясните молекулярный механизм возникновения давления на стенки сосуда с газом.
3. Какое выражение называют уравнением состояния системы? Запишите уравнение состояния идеального газа и поясните его.
4. Перечислите основные виды изопроцессов и запишите их уравнения. При каких условиях на практике можно применять законы изопроцессов?
5. Почему на рис. 3 и рис. 4 вблизи абсолютного нуля графики проведены пунктиром?
6. Можно ли с помощью описанного в лабораторной работе компьютерного приложения исследовать изобарический процесс?

7. Во сколько раз изменится давление газа в цилиндре, если его объём уменьшить, продвинув поршень на  $\frac{1}{3}$  высоты цилиндра? Температура газа не меняется.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Физика для профессий и специальностей технического профиля: учебник для образоват. учреждений нач. и сред. проф. образования / В.Ф.Дмитриева. – 6-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2013. – 448 с.
2. Физика для профессий и специальностей технического профиля. Сборник задач: учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования / В.Ф.Дмитриева. – 4-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2014. – 256 с.

## Лабораторная работа № 2.3

### ОПЫТНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ЗАКОНА ГЕЙ-ЛЮССАКА

Цель работы: экспериментально изучить изобарный процесс, сравнивая отношение объёмов газа с отношением температур при фиксированном давлении.

Приборы и принадлежности: стеклянная трубка, запаянная с одного конца, длиной 600 мм и диаметром 8-10 мм; цилиндрический сосуд высотой 600 мм и диаметром 40-50 мм, наполненный горячей водой ( $t \sim 60^\circ\text{C}$ ); стакан с водой комнатной температуры, пластилин, термометр, линейка.

### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В 1802 году французский учёный Жозеф Луи Гей-Люссак (1778-1850), исследуя зависимость объёма газа от температуры при постоянном давлении, установил закон, названный со временем в его честь.

*Процесс, протекающий в газе, при котором давление остаётся постоянным, называется **изобарным** («барос» – тяжёлый).*

Обобщив экспериментальные данные, Гей-Люссак установил, что с изменением температуры при постоянном давлении относительный объём данной массы газа изменяется линейно.

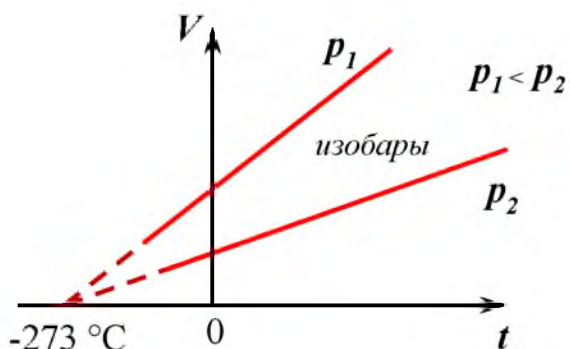
На основании наблюдений он сформулировал утверждение, названное в его честь **законом Гей-Люссака: объём газа данной массы при постоянном давлении, возрастает линейно с увеличением температуры:**

$$V = V_0(1 + \alpha \cdot t),$$

где  $V$  – объём газа при температуре  $t^\circ\text{C}$ ;  $V_0$  – объём газа при  $0^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  – температурный коэффициент объёмного расширения.

Расчёты показали, что все разреженные газы при нагревании на  $1^\circ\text{C}$  или 1 К изменяют свой объём приблизительно на  $1/273$  часть от начального объёма, т.е.  $\alpha \approx \frac{1}{273} \text{K}^{-1}$ .

На координатной плоскости зависимости объема  $V$  от температуры  $t$  изображаются прямыми линиями – **изобарами**, которые сходятся в одной точке. Их наклон зависит от значения давления – изобара, которая отвечает



большому давлению, проходит ниже изобары меньшего давления ( $p_1 < p_2$ ). При низких температурах (близких к  $-273\text{ °C}$ ) газы сжижаются и закон Гей-Люссака не выполняется, поэтому сплошная линия на графике заменяется пунктирной.

Закон Гей-Люссака приобретёт более простую форму, если его выразить через абсолютную температуру. Поскольку

$$1 + \alpha \cdot t = 1 + \frac{1}{273}(T - 273) = \alpha \cdot T,$$

то

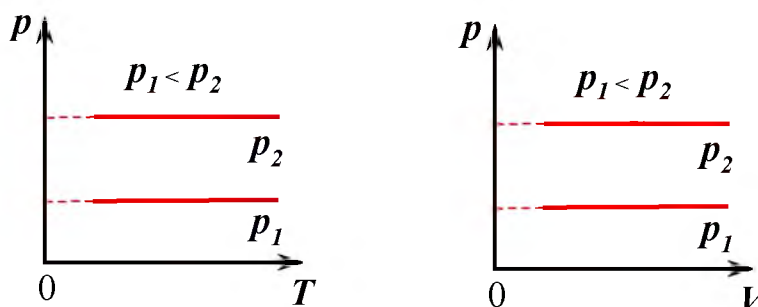
$$V = V_0 \cdot \alpha \cdot T.$$

Таким образом другая формулировка закона Гей-Люссака – **при постоянном давлении объем данной массы газа прямо пропорциональный абсолютной температуре.**

Закон Гей-Люссака в третьей формулировке утверждает, что **в изобарном процессе отношение объёмов данной массы газа в разных состояниях равно отношению абсолютных температур газа в этих состояниях:**

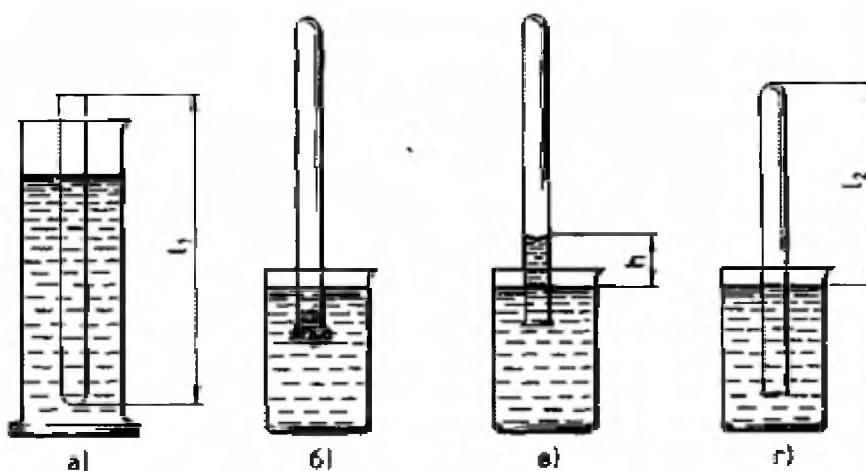
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Очевидно, что на координатных плоскостях  $pT$  и  $pV$  изобарами являются прямые, перпендикулярные оси давления:



Чтобы проверить закон Гей-Люссака, достаточно измерить объем и температуру газа в двух состояниях при постоянном давлении и проверить справедливость равенства  $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$ .

Это можно осуществить, используя воздух при атмосферном давлении. Стекло́нная трубка открытым концом вверх помещается на 3-5 мин в цилиндрический сосуд с горячей водой (рис. а). В этом случае объем воздуха  $V_1$  равен объёму стеклянной трубки, а температура – температуре горячей воды  $T_1$ . Это – первое состояние.



Чтобы при переходе воздуха в следующее состояние его количество не изменилось, открытый конец стеклянной трубки, находящейся в горячей воде, замазывают пластилином. После этого трубку вынимают из сосуда с горячей водой и замазанный конец быстро опускают в стакан с водой комнатной температуры (рис. б), а затем прямо под водой снимают пластилин. По мере охлаждения воздуха в трубке вода в ней будет подниматься. После прекращения подъёма воды в трубке (рис. в) объем воздуха в ней станет равным  $V_2 < V_1$ , а давление  $p = p_{атм} - pgh$ .

Чтобы давление воздуха в трубке вновь стало равным атмосферному, необходимо увеличивать глубину погружения трубки в стакан до тех пор, пока уровни воды в трубке и в стакане не выровняются (рис. г). Это будет второе состояние воздуха в трубке при температуре  $T_2$  окружающего воздуха.



Отношение объёмов воздуха в трубке в первом и втором состояниях можно заменить отношением высот воздушных столбов в трубке в этих состояниях, если сечение трубки постоянно по всей длине. Действительно, т.к.

$V_1 = S \cdot L_1$  и  $V_2 = S \cdot L_2$ , где  $S$  – площадь сечения трубки), то  $\frac{V_1}{V_2} = \frac{L_1}{L_2}$ . Поэтому в

работе следует сравнить отношения  $\frac{L_1}{L_2} = \frac{T_1}{T_2}$ .

Длина воздушного столба измеряется линейкой, температура – термометром.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Измерьте длину  $L_1$  узкой стеклянной трубки (все измеряемые величины записывайте в таблицу измерений).
2. Наполните укреплённый в штативе цилиндрический сосуд горячей водой, не превышающей  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
3. Опустите в сосуд с горячей водой узкую стеклянную трубку запаянным концом вниз на 3-5 мин (рис.а).
4. Измерить температуру  $t_1$  горячей воды термометром.
5. Плотнo закройте открытый конец трубки пластилином. Выньте трубку из сосуда с горячей водой и сразу же опустить её в стакан калориметра с водой комнатной температуры закрытым концом вниз. Снимите пластилин (рис.б).
6. По мере охлаждения воздуха в трубке вода в ней будет подниматься. После прекращения подъёма воды погрузите трубку в стакан до тех пор, пока уровень воды в трубке не сравняется с уровнем в стакане (рис.в).
7. Измерьте длину  $L_2$  части трубки, находящейся в воздухе (рис.г).
8. Измерьте температуру  $t_2$  воздуха в комнате.

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

1. Вычислите отношение  $\frac{L_1}{L_2}$  и запишите его в таблицу.
2. Переведите температуры  $t_1$  и  $t_2$  в кельвины ( $T = t + 273$ ).
3. Вычислите отношение  $\frac{T_1}{T_2}$ .
4. Вычислите относительные ( $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ ) и абсолютные ( $\Delta_1$  и  $\Delta_2$ ) погрешности измерений этих соотношений по формулам:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L_1}{L_1} + \frac{\Delta L_2}{L_2}, \quad \Delta_1 = \frac{L_1}{L_2} \cdot \varepsilon_1;$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta T_1}{T_1} + \frac{\Delta T_2}{T_2}, \quad \Delta_2 = \frac{T_1}{T_2} \cdot \varepsilon_2,$$

где  $\Delta L_1 = \Delta L_2 = 2$  мм,  $\Delta T_1 = \Delta T_2 = 1$  К

5. Сравните отношения  $\frac{L_1}{L_2}$  и  $\frac{T_1}{T_2}$  (в пределах абсолютных погрешностей они должны совпадать).
6. Сделайте окончательный вывод по работе, в котором укажите выполняется ли в пределах погрешностей закон Гей-Люссака для данного опыта.

*Таблица измерений*

$L_1, \text{ мм}$	Температура воды		$L_2, \text{ мм}$	Температура воздуха		$\frac{L_1}{L_2}$	$\frac{T_1}{T_2}$	$\Delta_1$	$\Delta_2$
	$t_1, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_1, \text{ К}$		$t_2, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_2, \text{ К}$				

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой процесс называется изобарным?
2. Приведите разные формулировки закона Гей-Люссака.
3. Какими линиями изображаются изобары на координатной плоскости  $Vt$ ?
4. Почему после погружения стеклянной трубки в стакан с водой комнатной температуры и после снятия пластины вода в трубке поднимается?
5. Почему при равенстве уровней воды в стакане и в трубке давление воздуха в трубке равно атмосферному?
6. Объясните закон для изобарического процесса, пользуясь молекулярно-кинетической теорией.
7. Постройте изобары для воздуха массой 1 кг при нормальных условиях в осях  $p, T$ ;  $p, V$ ;  $V, T$ . (Нормальные условия – физические условия, определяемые давлением  $p_0 = 101\,325$  Па (760 мм.рт.ст.) и температурой  $T_0 = 273,15$  К ( $0^\circ\text{C}$ ), при которых молярный объём газа  $V_{\mu 0} = 22,4 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/моль. Молярную массу воздуха примите равной 29 г/моль).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Физика для профессий и специальностей технического профиля: учебник для образоват. учреждений нач. и сред. проф. образования / В.Ф.Дмитриева. – 6-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2013. – 448 с.
2. Физика для профессий и специальностей технического профиля. Сборник задач: учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования / В.Ф.Дмитриева. – 4-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2014. – 256 с.

## Лабораторная работа № 2.4

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ ПЛАВЛЕНИЯ ЛЬДА

Цель работы: пользуясь уравнением теплового баланса, вычислить удельную теплоту плавления льда.

Приборы и принадлежности: калориметр, сосуд с тающим льдом, сосуд с водой, весы с разновесами, термометр.

### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Одно и то же вещество может при определённых условиях находиться в твёрдом (кристаллическом), жидком и газообразном состояниях или фазах. Переход из одной фазы в другую (фазовый переход) происходит скачком при изменении температуры, давления или под действием каких-либо других внешних факторов.

**Плавление** – процесс перехода вещества из твёрдого состояния в жидкое, сопровождающийся поглощением энергии.

В процессе плавления кристаллическая решётка разрушается, потенциальная энергия молекул, а значит и внутренняя энергия тела увеличивается. Но кинетическая энергия молекул, а значит, и температура тела остаются постоянными. Следовательно, полученная жидкость имеет температуру плавления твёрдого тела.

*Количество теплоты, необходимое для плавления единицы массы вещества при температуре плавления, называется **удельной теплотой плавления**  $\lambda$  (Дж/кг).*

Удельную теплоту плавления льда можно определить калориметрическим способом. Для этого в калориметр с водой погружают кусочек тающего льда. В процессе теплообмена горячая вода отдаёт количество теплоты  $Q_B$ , лёд получает от горячей воды количество теплоты  $Q_L$ , плавится и получившаяся из льда талая вода нагревается, получая количество теплоты  $Q_T$ . Согласно уравнению теплового баланса:

$$Q_B = Q_L + Q_T \quad (1)$$

или

$$c_B m_B (t_B - t_{\text{кон}}) = \lambda m_L + c_B m_L (t_{\text{кон}} - t_L), \quad (2)$$

откуда удельная теплота плавления льда (с учётом, что тающий лёд имеет температуру  $t_L = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) равна:

$$\lambda = \frac{c_B m_B (t_B - t_{\text{кон}}) - c_B m_L t_{\text{кон}}}{m_L}.$$

После упрощения, имеем:

$$\lambda = \frac{c_B m_B \left[ t_B - t_{\text{кон}} \left( 1 - \frac{m_L}{m_B} \right) \right]}{m_L}, \quad (3)$$

где  $c_B = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$  – удельная теплоёмкость воды;

$m_B$  – масса воды;

$t_B$  – начальная температура воды;

$t_{\text{кон}}$  – конечная установившаяся температура;

$m_L$  – масса льда.



## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Общий вид приложения показан на рисунке:



В окне приложения представлены все приборы и материалы, используемые в данной лабораторной работе. Все манипуляции выполняются курсором мышки.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Запустите приложение «Определение удельной теплоты плавления льда».
2. Налейте в мерный стакан горячую воду, перетащив его курсором мышки. Объём горячей воды в миллилитрах соответствует массе горячей воды  $m_в$  в граммах. Запишите его в таблицу измерений.
3. Перелейте воду из мерного стакана в калориметр и определите температуру  $t_в$  налитой воды. Запишите её в таблицу измерений.
4. Нажмите кнопку «далее»  чтобы перейти к следующему экрану.
5. Поместите кубики льда на чашу весов и определите их массу  $m_л$ , перетаскивая курсором мышки мерные гирьки на другую чашу весов. Запишите массу льда в таблицу измерений.
6. Опустите лёд в калориметр и дождитесь пока он полностью растает.
7. Определите конечную установившуюся температуру  $t_{кон}$ . Запишите её в таблицу измерений.
8. Нажмите кнопку «Повтор»  чтобы начать опыт сначала.
9. Повторите измерения п.п.2-7 ещё два раза, для различных объёмов горячей воды.

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. По формуле (3) вычислите значение удельной теплоёмкости льда для трёх опытов (При вычислениях массу воды и льда можно оставить в граммах, поскольку в числителе и знаменателе дроби переводной коэффициент в СИ сократится). Результаты запишите в таблицу измерений.

7. Вычислите среднее значение удельной теплоёмкости льда по результатам

опыта  $\left( \lambda_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^3 \lambda_i}{3} \right)$  и запишите его в таблицу измерений.

8. Оцените абсолютную погрешность измерения удельной теплоёмкости льда

по формуле:  $\Delta\lambda = |\lambda_{cp} - \lambda_{теор}|$ , где  $\lambda_{теор} = 3,35 \cdot 10^5$  Дж/К.

9. Вычислите относительную погрешность измерения:  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{cp}}, \%$

10. Полностью заполните таблицу измерений, занеся полученные погрешности в соответствующие ячейки.

11. Сделайте общий вывод по работе с указанием вычисленного значения удельной теплоёмкости льда:

$$\lambda = (\lambda_{cp} \pm \Delta\lambda) \frac{\text{Дж}}{\text{кг}},$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{cp}} \approx \dots \% \text{ (округлите до целого числа!)}$$

Таблица измерений

№	$m_в, \text{Г}$	$t_в, \text{°C}$	$m_л, \text{Г}$	$t_{кон}, \text{°C}$	$\lambda, \text{Дж/кг}$	$\lambda_{теор}, \text{Дж/кг}$	$\Delta\lambda, \text{Дж/кг}$	$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{cp}}, \%$
1						$3,35 \cdot 10^5$		
2								
3								
Ср.	—	—	—	—				

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое плавление? Какие физические процессы при этом происходят в веществе?
2. Что такое удельная теплота плавления?
3. Как изменяется кинетическая энергия молекул при нагревании твёрдого тела до точки плавления и при плавлении?
4. В воду, находящуюся в термосе при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , опустили кусочек льда, температура которого  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Будет ли лёд плавиться? Почему?
5. Объясните суть калориметрического способа измерения удельной теплоты плавления льда.
6. В каком случае погрешность измерений в данной работе будет меньше, при быстром выполнении всех операций или при медленном? Почему?
7. Кусок льда массой  $3\text{ кг}$  имеет температуру  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Какое количество теплоты необходимо ему передать, чтобы превратить лёд в воду, имеющую температуру  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Физика для профессий и специальностей технического профиля: учебник для образоват. учреждений нач. и сред. проф. образования / В.Ф.Дмитриева. – 6-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2013. – 448 с.
2. Физика для профессий и специальностей технического профиля. Сборник задач: учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования / В.Ф.Дмитриева. – 4-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2014. – 256 с.



## Лабораторная работа № 2.5

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ

Цель работы: определение поверхностного натяжения жидкостей методом отрыва капель и изучение влияния поверхностно-активных веществ на поверхностное натяжение.

Приборы и принадлежности: закреплённая в штативе бюретка, дистиллированная вода, 10% раствор этилового спирта, 10% раствор поваренной соли, химический стакан.

### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

**Жидкость** – агрегатное состояние вещества, промежуточное между твёрдым и газообразным.

Жидкости присущи некоторые черты твёрдого тела (сохраняет свой объём, образует поверхность, мало сжимаема) и газа (принимает форму сосуда, в котором находится). В то же время она обладает характерной особенностью – *текучестью*.

С точки зрения характера расположения молекул друг относительно друга (согласно рентгенографическим исследованиям) положение жидкости также промежуточное:

- 1) газы не имеют порядка в расположении молекул;
- 2) твёрдые тела (кристаллы) имеют упорядоченное расположение частиц по отношению к любой частице объёма кристалла – так называемый «дальний порядок»;
- 3) жидкости имеют некоторую упорядоченность в расположении только соседних молекул (так называемый «ближний порядок»), а на больших расстояниях порядок «размывается» и переходит в «беспорядок».

С точки зрения теплового движения частиц, положение жидкости также промежуточное.

В газах среднее расстояние между соседними молекулами гораздо больше их размеров (рис. 1). Тепловое движение в газах представляет собой

поступательное и одновременно вращательное (для молекул из нескольких атомов) движение молекул, в результате чего молекулы постоянно перемещаются в объёме газообразного вещества.



Рис. 1

В твёрдых кристаллических телах молекулы расположены на расстояниях, соизмеримых с размерами молекул в правильном периодическом порядке и составляют кристаллическую решётку (рис. 1). Тепловое движение в кристаллах сводится к колебаниям молекул около положений равновесия.

В жидкостях средние расстояния между соседними молекулами соизмеримы с размерами самих молекул, а тепловое движение молекул является в основном колебательным и поступательным (рис. 1).

Промежуточное положение жидкости обуславливает тот факт, что жидкое состояние оказывается особенно сложным по своим свойствам. Поэтому его теория, гораздо менее развита, чем теория кристаллического и газообразного состояния. До сих пор нет вполне законченной и общепринятой теории жидкостей. Значительные заслуги в разработке ряда проблем теории жидкого состояния принадлежит советскому физику-теоретику Якову Ильичу Френкелю.

Согласно Френкелю, тепловое движение молекул в жидкости имеет следующий характер. Каждая молекула в течение некоторого времени ( $\sim 10^{-12}$  с) колеблется около определённого положения равновесия. Время от времени молекула может менять положение равновесия, скачком перемещаясь в новое

положение, отстоящее от предыдущего на расстояние порядка размеров самих молекул ( $\sim 10^{-10}$  м). По образному выражению Я.И. Френкеля, молекулы странствуют по всему объёму жидкости, ведя кочевой образ жизни, при котором кратковременные переезды сменяются относительно длинными периодами осёдлой жизни ( $\tau \sim 10^{-10}$  с). То есть молекула в среднем совершает 100 колебаний – скачок – 100 колебаний – скачок и т.д. Время осёдлой жизни  $\tau$  резко уменьшается при повышении температуры, когда возрастает подвижность молекул, а, следовательно, и текучесть.

### ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ

Молекулы жидкости располагаются настолько близко друг к другу, что сильное межмолекулярное взаимодействие обуславливает существование *поверхностного натяжения* на границе жидкости с любой другой средой. Однако величина молекулярных сил быстро убывает с увеличением расстояния между молекулами и на расстояниях порядка  $10^{-8}$ – $10^{-9}$  м – предельного радиуса молекулярного взаимодействия – практически равна нулю.

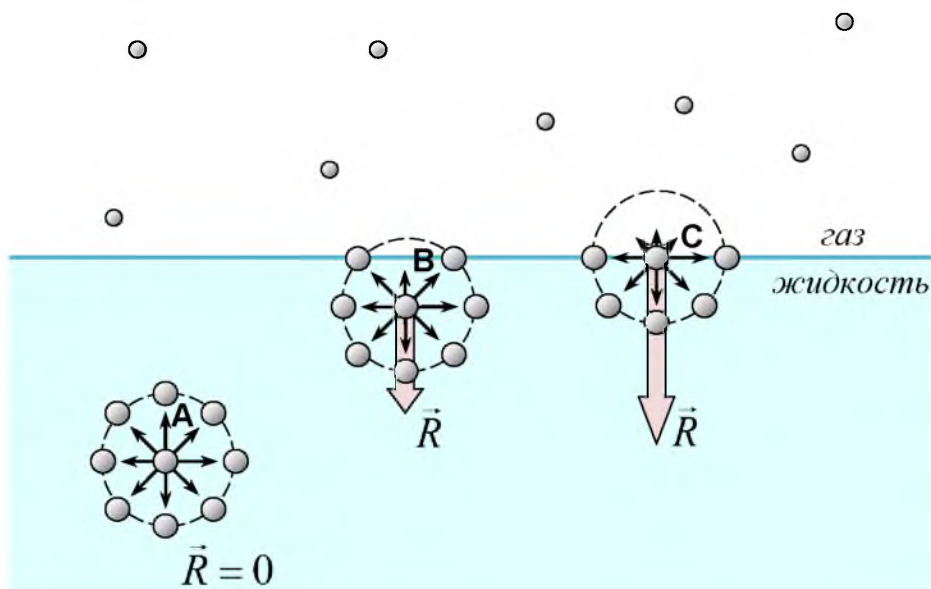


Рис. 2

Рассмотрим границу раздела газ–жидкость (рис. 2). Любая молекула (А), находящаяся внутри жидкости, испытывает взаимодействие (притяжение) со

стороны окружающих молекул лежащих в сфере молекулярного взаимодействия с центральной молекулой и равнодействующая  $\vec{R}$  всех сил притяжения равна нулю.

Если же центральная молекула (**В**) находится близко к поверхности жидкости, на расстоянии от неё меньшем, чем радиус молекулярного взаимодействия, то равнодействующая  $\vec{R}$  уже не равна нулю. В этом случае часть сферы выходит за пределы жидкости и действие молекул внутри сегмента под поверхностью не компенсируется действием молекул воздуха или пара, находящихся в сегменте над поверхностью жидкости, т.к. их взаимодействие с молекулой (**В**) значительно слабее. Равнодействующая сила  $\vec{R}$  будет направлена *внутрь* жидкости *перпендикулярно* к её поверхности в данной точке. Для молекулы (**С**), находящейся на самой поверхности жидкости равнодействующая сила  $\vec{R}$  принимает максимальное значение.

Таким образом, на каждую молекулу, лежащую от поверхности жидкости на расстоянии меньше радиуса молекулярного взаимодействия, со стороны других молекул действует сила, направленная внутрь жидкости. На весь слой, лежащий у поверхности, действуют силы, направленные нормально к поверхности внутрь жидкости. Поверхностный слой оказывает на всю жидкость давление, называемое *молекулярным давлением* и достигающим для всех жидкостей величины порядка десятка тысяч атмосфер, чем и объясняется практическая несжимаемость жидкостей при использовании обычных давлений (50–100 атмосфер).

На молекулы, которые в силу теплового движения, попадают в поверхностный слой, будут, следовательно, действовать силы поверхностного давления, стремящиеся втянуть их назад в жидкость. Поэтому молекулам, чтобы достичь поверхности жидкости, надо совершить работу против указанных сил. На эту работу затрачивается часть кинетической энергии молекул, которая и переходит в энергию потенциальную.

Как мы уже отметили, молекулы поверхностного слоя втягиваются внутрь жидкости, их потенциальная энергия больше, чем у молекул внутри жидкости, следовательно, поверхностный слой в целом обладает дополнительной (избыточной) потенциальной энергией  $E_{\text{п}}$ , причём на единицу площади поверхности  $S$  жидкости приходится энергия:

$$\sigma = \frac{E_{\text{п}}}{S}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение. Оно численно равно дополнительной потенциальной энергии  $E_{\text{п}}$ , приходящейся на единицу поверхности  $S$  жидкости.

В СИ  $[\sigma] = 1 \text{ Дж/м}^2$ .

Стремление жидкости сократить размеры своей свободной поверхности приводит к тому, что поверхностный слой подобен растянутой упругой плёнке. В этом случае, как и в упругой плёнке<sup>7</sup>, действуют силы натяжения, называемые *силами поверхностного натяжения*. В этом позволяет убедиться простой опыт: привяжем к проволочному кольцу нить, как это показано

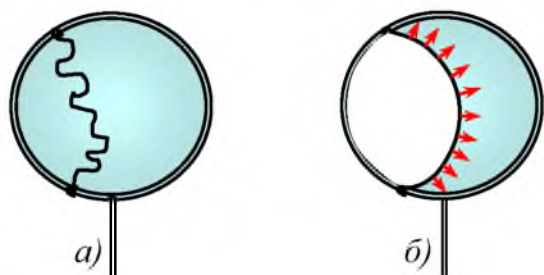


Рис. 3

на рис. 3а, и окунём кольцо в мыльный раствор. В образовавшейся мыльной плёнке нить расположится случайным образом. Если теперь разрушить плёнку по одну сторону нити, то оставшаяся плёнка сократится так, чтобы её поверхность стала минимальной (рис. 3б).

Нить удерживается в натянутом состоянии силами поверхностного натяжения, направленными внутрь плёнки по касательной к её поверхности.

Значение силы поверхностного натяжения определяется выражением:

$$F = \sigma \cdot l, \quad (2)$$

где  $l$  – длина контура плёнки.

<sup>7</sup> Однако сходство с упругими силами в растянутой плёнке не полное, т.к. чем сильнее растянута упругая плёнка, тем большие силы упругости в ней действуют, для данной же жидкости (при данных условиях) силы поверхностного натяжения всегда остаются неизменными!

Формула (2) означает, что поверхностный слой молекул, стремясь сократиться, действует на единицу длины границы с силой равной  $\sigma$ . Это позволяет дать **другое определение поверхностного натяжения**, как силы  $\vec{F}$ , действующей со стороны поверхностного слоя на единицу длины контура  $l$ , ограничивающего этот слой:

$$\sigma = \frac{F}{l}. \quad (3)$$

В СИ  $[\sigma] = 1 \text{ Н/м}$ . Отметим, что  $1 \text{ Н/м} = 1 \text{ Дж/м}^2$ .

Опытным путём было установлено, что поверхностное натяжение зависит от:

1. природы жидкости;
2. температуры жидкости (при повышении температуры поверхностное натяжение чистых веществ уменьшается и при критической температуре обращается в ноль!);
3. наличия примесей (мыло, эфир, СМС и т.п. понижает поверхностное натяжение воды; соль, сахар и др. – повышают);
4. повышение давления приводит к уменьшению поверхностного натяжения при заметной взаимной растворимости фаз и к его возрастанию в противоположном случае (например, в системе вода-гелий).

### Теория и методика эксперимента

Определение поверхностного натяжения жидкостей в данной работе основано на методе отрыва капель. Его суть заключается в следующем: если у вертикально поставленной трубки с узким отверстием (бюретки) медленно открывать кран, то на конце отверстия образуется капля. Её размер увеличивается до тех пор, пока сила тяжести, действующая на каплю, не превысит силу поверхностного натяжения, т.е. при условии  $mg > F_H$  капля отрывается от конца бюретки (рис. 4)

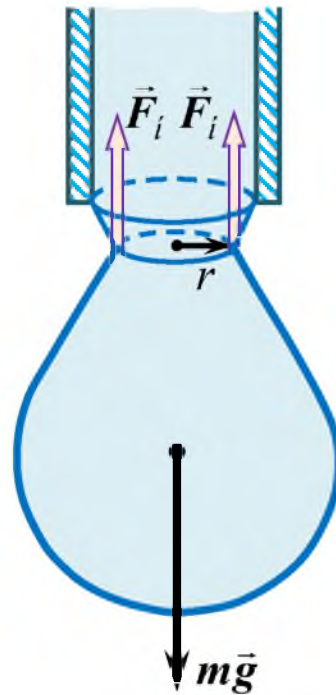
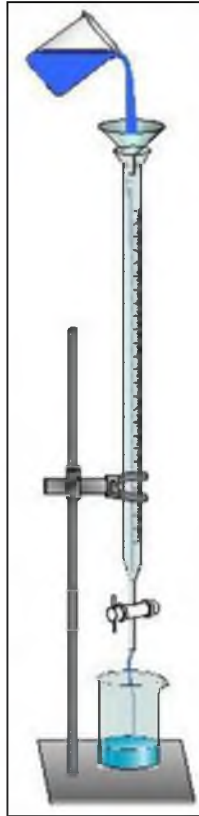


Рис. 4

По определению

$$F_H = \sigma \cdot \ell$$

или

$$F_H = \sigma \cdot 2\pi r,$$

где  $r$  – радиус шейки капли.

Приравнявая силу тяжести и силу поверхностного натяжения в момент отрыва капли, получим:

$$mg = \sigma \cdot 2\pi r.$$

Откуда

$$\sigma = \frac{mg}{2\pi r}.$$

Определение радиуса  $r$  шейки капли *затруднительно*, поэтому воспользуемся методом сравнения поверхностного натяжения  $\sigma$  исследуемой жидкости с поверхностным натяжением  $\sigma_0$  эталонной жидкости (например, дистиллированной воды), *используя одну и ту же бюретку*.

Для дистиллированной воды имеем:  $m_0 g = \sigma_0 \cdot 2\pi r_0$ .

Для исследуемой жидкости:  $mg = \sigma \cdot 2\pi r$ .

Считая радиусы шеек в обоих случаях одинаковыми ( $r_0 \approx r$ ), разделим почленно эти равенства:

$$\frac{m_0 g}{mg} = \frac{\sigma_0 \cdot 2\pi r_0}{\sigma \cdot 2\pi r}$$

Откуда

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \frac{m}{m_0}$$

Нахождение масс  $m$  и  $m_0$  заменим подсчётом числа капель  $n$  исследуемой жидкости и числа капель  $n_0$  дистиллированной воды в одинаковом объёме  $V$ :

$$m = \frac{\rho V}{n}; \quad m_0 = \frac{\rho_0 V}{n_0},$$

где  $\rho$  и  $\rho_0$  – плотности исследуемой жидкости и дистиллированной воды при данной температуре.

Окончательно имеем:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \frac{\rho n_0}{\rho_0 n} \quad (4)$$

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подставьте под бюретку химический стакан, промойте бюретку дистиллированной водой и вылейте воду в отдельную посуду (в дальнейшем не используется).
2. Проверьте, чтобы кран бюретки был закрыт и налейте в её дистиллированную воду. Открыв кран, отрегулируйте скорость вытекания капель так, чтобы удобно было производить подсчёт числа капель (вода должна капать в ёмкость, из которой её налили).



3. Сосчитайте число  $n_{0i}$  ( $i = 1, 2, 3$ ) капель воды в объёме  $3 \text{ см}^3$  (3 мл) **три** раза и запишите в табл. 1.
4. Слейте дистиллированную воду в ёмкость, из которой её наливали, и осторожно выдуйте остатки воды из бюретки резиновой грушей, закройте кран бюретки.
5. Налейте в бюретку 10% раствор этилового спирта. Открыв кран, снова отрегулируйте скорость вытекания капель так, чтобы удобно было производить подсчёт числа капель (раствор спирта должен капать в ёмкость, из которой его наливали).
6. Сосчитайте число  $n_{1i}$  ( $i = 1, 2, 3$ ) капель раствора спирта в объёме  $3 \text{ см}^3$  (3 мл) **три** раза и запишите в табл. 1.
7. Слейте 10% раствор этилового спирта в ёмкость, из которой его наливали, промойте бюретку дистиллированной водой и вылейте воду в отдельную посуду (в дальнейшем не используется).
8. Осторожно выдуйте остатки дистиллированной воды из бюретки резиновой грушей и закройте кран бюретки.
9. Налейте в бюретку 10% раствор поваренной соли. Открыв кран, снова отрегулируйте скорость вытекания капель так, чтобы удобно было производить подсчёт числа капель (раствор соли должен капать в ёмкость, из которой его наливали).
10. Сосчитайте число  $n_{2i}$  ( $i = 1, 2, 3$ ) капель раствора соли в объёме  $3 \text{ см}^3$  (3 мл) **три** раза и запишите в табл. 1.
11. Слейте 10% раствор поваренной соли в ёмкость, из которой его наливали, промойте бюретку дистиллированной водой и вылейте воду в отдельную посуду. Осторожно выдуйте остатки воды из бюретки резиновой грушей. Кран бюретки оставьте открытым.

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Вычислите средние значения для числа капель дистиллированной воды  $n_{0cp}$ ,

растворов спирта  $n_{1cp}$  и поваренной соли  $n_{2cp}$  по формуле  $n_{i\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^3 n_i}{3}$ .

Результаты занесите в табл. 1.

2. Рассчитайте абсолютные погрешности измерений числа капель дистиллированной воды  $\Delta n_{0i}$ , растворов спирта  $\Delta n_{1i}$  и поваренной соли  $\Delta n_{2i}$  по формулам:  $\Delta n_{0i} = |n_{0i\text{cp}} - n_{0i}|$ ,  $\Delta n_{1i} = |n_{1i\text{cp}} - n_{1i}|$  и  $\Delta n_{2i} = |n_{2i\text{cp}} - n_{2i}|$ . Результаты занесите в табл. 1.

3. Вычислите абсолютные погрешности измерения числа капель дистиллированной воды  $\Delta n_{0cp}$ , растворов спирта  $\Delta n_{1cp}$  и поваренной соли  $\Delta n_{2cp}$  по формулам:

$$\Delta n_{0cp} = 1,76 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^3 \Delta n_{0i}^2}, \quad \Delta n_{1cp} = 1,76 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^3 \Delta n_{1i}^2}, \quad \Delta n_{2cp} = 1,76 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^3 \Delta n_{2i}^2}.$$

Результаты занесите в табл. 1.

4. Рассчитайте значения поверхностного натяжения растворов спирта ( $\sigma_1$ ) и поваренной соли ( $\sigma_2$ ) по формулам:

$$\sigma_1 = \sigma_0 \cdot \frac{\rho_1 n_{0cp}}{\rho_0 n_{1cp}} \quad \text{и} \quad \sigma_2 = \sigma_0 \cdot \frac{\rho_2 n_{0cp}}{\rho_0 n_{2cp}},$$

где значения величин  $\sigma_0$ ,  $\rho_0$ ,  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  приведены в Приложении и запишите в табл. 2.

5. Вычислите относительные погрешности измерения поверхностного натяжения растворов спирта  $\left(\frac{\Delta \sigma_1}{\sigma_1}\right)$  и поваренной соли  $\left(\frac{\Delta \sigma_2}{\sigma_2}\right)$  по формулам:

$$\frac{\Delta\sigma_1}{\sigma_1} = \sqrt{\left(\frac{\Delta n_{0cp}}{n_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta n_{1cp}}{n_1}\right)^2}, \quad \frac{\Delta\sigma_2}{\sigma_2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta n_{0cp}}{n_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta n_{2cp}}{n_2}\right)^2}$$

и запишите в табл. 2.

6. Вычислите абсолютные погрешности измерения поверхностного натяжения растворов спирта  $\Delta\sigma_1$  и поваренной соли  $\Delta\sigma_2$  по формулам:

$$\Delta\sigma_1 = \sigma_1 \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_1}{\sigma_1}\right), \quad \Delta\sigma_2 = \sigma_2 \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_2}{\sigma_2}\right).$$

и запишите в табл. 2.

7. Сделайте вывод по работе, в котором отразите: что и каким методом измерялось, какие результаты получены, как влияют на поверхностное натяжение поверхностно-активные вещества. Результаты расчётов поверхностных натяжений растворов спирта и поваренной соли запишите в виде:

$$\sigma_1 = \left(\sigma_{1cp} \pm \Delta\sigma_1\right) \frac{mH}{M}, \quad \frac{\Delta\sigma_1}{\sigma_1} \approx \dots\% \quad \text{и} \quad \sigma_2 = \left(\sigma_{2cp} \pm \Delta\sigma_2\right) \frac{mH}{M}, \quad \frac{\Delta\sigma_2}{\sigma_2} \approx \dots\%.$$

#### ПРИМЕЧАНИЯ:

1. По указанию преподавателя расчёт ошибок можно провести на компьютере, используя соответствующую программу.
2. По указанию преподавателя можно исследовать влияние концентрации примеси на поверхностное натяжение воды. В этом случае используются: дистиллированная вода, растворы этилового спирта 10% и 20% и/или растворы поваренной соли 10% и 20%.

Таблица 1

Измерения и результаты для числа капель различных жидкостей

№	$n_{0i}$	$n_{1i}$	$n_{2i}$	$\Delta n_{0i}$	$\Delta n_{1i}$	$\Delta n_{2i}$	$\Delta n_{0cp}$	$\Delta n_{1cp}$	$\Delta n_{2cp}$
1.							—	—	—
2.							—	—	—
3.							—	—	—
Ср.				—	—	—			

Таблица 2

Результаты для поверхностного натяжения различных жидкостей

	$\sigma_1$ , мН/м	$\Delta\sigma_1$ , мН/м	$\frac{\Delta\sigma_1}{\sigma_1}$ , %	$\sigma_2$ , мН/м	$\Delta\sigma_2$ , мН/м	$\frac{\Delta\sigma_2}{\sigma_2}$ , %
Ср.						

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### 1. Поверхностное натяжение воды

Температура, °С	0	10	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
$\sigma$ , мН/м	75,62	74,22	72,75	71,96	71,15	69,55	67,91	66,17	64,27	62,50	60,68	58,80

### 2. Поверхностное натяжение этилового спирта

Температура, °С	0	10	20	25	30	40	50	60
$\sigma$ , мН/м	24,05	23,15	22,03	21,75	21,48	20,20	19,80	18,43

### 3. Плотности некоторых веществ при различных температурах

Температура, °С	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	30
Вода, кг/м <sup>3</sup>	999,1	998,9	998,8	998,6	998,4	998,2	998,0	997,8	997,5	997,3	997,0	995,6
Этиловый спирт (96%), кг/м <sup>3</sup>	800,1	–	–	–	–	766,7	–	–	–	–	–	788,9
Этиловый спирт (10%), кг/м <sup>3</sup>	988,4	–	–	–	–	988,0	–	–	–	–	–	980,0
Этиловый спирт (20%), кг/м <sup>3</sup>	971,2	–	–	–	–	966,7	–	–	–	–	–	948,9
Раствор поваренной соли (10%), кг/м <sup>3</sup>	–	–	–	–	–	1070,7	–	–	–	–	–	–
Раствор поваренной соли (20%), кг/м <sup>3</sup>	–	–	–	–	–	1147,8	–	–	–	–	–	–

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каково строения газообразных, жидких, твёрдых веществ?
2. Каков характер движения частиц газообразных, жидких, твёрдых веществ?
3. Опишите состояние молекулы внутри жидкости и в поверхностном слое.

4. Почему молекулы поверхностного слоя обладают дополнительной потенциальной энергией?
5. Какие силы получили название «силы поверхностного натяжения»? Каково их происхождение? От чего зависят? Как направлены?
6. Как убедиться в существовании сил поверхностного натяжения?
7. Что понимают под поверхностным натяжением? Как оно рассчитывается?
8. От чего зависит поверхностное натяжение?
9. Вычислите поверхностное натяжение масла, если при пропускании через пипетку 3,6 г масла получено 304 капли. Диаметр шейки пипетки 1,2 мм.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Физика для профессий и специальностей технического профиля: учебник для образоват. учреждений нач. и сред. проф. образования / В.Ф.Дмитриева. – 6-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2013. – 448 с.
2. Физика для профессий и специальностей технического профиля. Сборник задач: учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования / В.Ф.Дмитриева. – 4-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2014. – 256 с.

## ОЦЕНКА ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ФИЗИКЕ

*Оценка «5» ставится в том случае, если студент:*

1. выполнил работу в полном объёме с соблюдением необходимой последовательности проведения опытов и измерений;
2. правильно и грамотно работает с необходимым оборудованием, все опыты провёл в условиях и режимах, обеспечивающих получение результатов и выводов с наибольшей точностью;
3. в представленном отчёте правильно и аккуратно выполнил все записи, таблицы, рисунки, чертежи, графики, вычисления и сделал выводы;
4. правильно выполнил анализ погрешностей;
5. соблюдал требования безопасности труда.

*Оценка «4» ставится в том случае, если выполнены требования к оценке «5», но:*

1. опыт проводился в условиях, не обеспечивающих достаточной точности измерений;
2. или было допущено два-три недочёта, или не более одной негрубой ошибки и одного недочёта.

*Оценка «3» ставится, если работа выполнена не полностью, но объём выполненной части таков, что позволяет получить правильные результаты и выводы, или если в ходе проведения опыта и измерений были допущены следующие ошибки:*

1. опыт проводился в нерациональных условиях, что привело к получению результатов большей погрешностью;
2. или в отчёте были допущены в общей сложности не более двух ошибок (в записях единиц, измерениях, в вычислениях, графиках, таблицах, схемах, анализе погрешностей и т.д.), не принципиального для данной работы характера, но повлиявших на результат выполнения;
3. или не совсем или выполнен неверно анализ погрешностей;

4. или работа выполнена не полностью, однако объём выполненной части таков, что позволяет получить правильные результаты и выводы по основным, принципиально важным задачам работы.

*Оценка «2» ставится в том случае, если:*

1. работа выполнена не полностью, и объём выполненной части работы не позволяет сделать правильных выводов,
2. или опыты, измерения, вычисления, наблюдения производились неправильно,
3. или в ходе работы и в отчёте обнаружилось в совокупности все недостатки, отмеченные в требованиях к оценке «3».

*Оценка «1» ставится в тех случаях, когда студент совсем не выполнил работу или не соблюдал требований техники безопасности труда.*

В тех случаях, когда студент показал оригинальный и наиболее рациональный подход к выполнению работы и в процессе работы, но не избежал тех или иных недостатков, оценка за выполнение работы по усмотрению преподавателя может быть повышена по сравнению с указанными выше нормами.

### **Перечень ошибок**

#### Грубые ошибки:

- ✓ незнание определений основных понятий, законов, правил, основных положений теории, формул, общепринятых символов обозначения физических величин, единиц их измерения;
- ✓ неумение выделить в ответе главное;
- ✓ неумение применять знания для решения задач и объяснения физических явлений; неправильно сформулированные вопросы задачи или неверные объяснения хода её решения; незнание приёмов решения задач, аналогичных ранее решённым в классе, ошибки, показывающие неправильное понимание условия задачи или неправильное истолкование решения;
- ✓ неумение читать и строить графики и принципиальные схемы;
- ✓ неумение подготовить к работе установку или лабораторное оборудование,

провести опыт, необходимые расчёты, или использовать полученные данные для выводов;

- ✓ небрежное отношение к лабораторному оборудованию и измерительным приборам;
- ✓ неумение определить показание измерительного прибора;
- ✓ нарушение требований правил безопасного труда при выполнении эксперимента.

#### Негрубые ошибки:

- ✓ неточности формулировок, определений, понятий, законов, теорий, вызванные неполнотой охвата основных признаков определяемого понятия, ошибки, вызванные несоблюдением условий проведения опыта или измерений;
- ✓ ошибки в условных обозначениях на принципиальных схемах, неточности чертежей, графиков, схем;
- ✓ пропуск или неточное написание наименований единиц физических величин;
- ✓ нерациональный выбор хода решения.

#### Недочёты:

- ✓ нерациональные записи при вычислениях, нерациональные приёмы вычисления, преобразований и решений задач;
- ✓ арифметические ошибки в вычислениях, если эти ошибки грубо не искажают реальность полученного результата;
- ✓ отдельные погрешности в формулировке вопроса или ответа;
- ✓ небрежное выполнение записей, чертежей, схем, графиков;
- ✓ орфографические и пунктуационные ошибки.



РЯЗАНСКИЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОЛЛЕДЖ

Методические указания по выполнению лабораторных работ

Абросимов Павел Викторович  
Зенякина Елена Васильевна

**Лабораторные работы по молекулярной физике и термодинамике**

Подписано в печать 27.11.17. Формат 84x108 1/32  
Гарнитура Таймс. Печать офсетная. Тираж 30 экз.  
Бумага мелованная. Усл. печ. л. – 2,57.

Издательство ОГБПОУ РСК  
390023, г. Рязань, ул. Циолковского, 22.  
(4912) 445639, 442662