

М И Н И С Т Е Р С Т В О
ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

НИКОЛАЕВСКИЙ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
КОРАБЛЕСТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ
имени адмирала С. О. Макарова

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Методические указания к лабораторным работам
по курсу физики

Под общ. ред. Н. Г. ГРИПИЧА

Николаев 1985

Молекулярная физика: Методические указания к лабораторным работам по курсу физики/ Под общ. ред. Н.Г.Грипича. - Николаев: НКИ, 1985. - 48 с.

Кафедра физики

В методических указаниях представлено описание лабораторных работ по молекулярной физике, проводимых в лабораториях кафедры физики НКИ и апробированных на протяжении ряда лет в ходе студенческих занятий. Лабораторные работы сгруппированы по циклам, охватывающим следующие разделы: законы идеального газа, теплота, поверхностное натяжение, вязкость в газах и жидкостях. Описание лабораторных работ составлено в соответствии с программой по курсу общей физики для инженерно-технических специальностей высших учебных заведений.

В конце методических указаний (Приложение I) приводятся контрольные вопросы ко всем работам, которые могут быть использованы при машинном способе контроля подготовленности студентов к их выполнению.

В составлении описаний лабораторных работ приняли участие преподаватели кафедры физики: М.Н.Балашова (работа М-13), В.Н.Бандура (работа М-11), В.И.Гаманович (работа М-9), Н.Г.Грипич (работа М-17), С.О.Земляная (работы М-16, М-19), А.Д.Кулик (работа М-10), В.Д.Носачук, Л.И.Тытченко (работа М-12), В.В.Попов (работа М-14), А.Н.Трунов (работа М-18), Е.Н.Шмандина (работа М-8).

Рецензент канд. физ.-мат. наук, доцент Г.Е.Четверкина

© Николаевский ордена Трудового Красного Знамени кораблестроительный институт, 1985

Лабораторная работа М-8 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ ПАРООБРАЗОВАНИЯ (КОНДЕНСАЦИИ) ВОДЫ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ КИПЕНИЯ

Ц е л ь р а б о т ы - изучение законов парообразования и конденсации жидкости.

Переход вещества из одной фазы в другую обычно сопровождается поглощением или выделением теплоты. Такие переходы называются фазовыми переходами первого рода. Существуют переходы, не связанные с поглощением и выделением теплоты - они называются фазовыми переходами второго рода. Если в процессе фазового перехода давление поддерживается постоянным, то температура не меняется, причем каждому давлению однозначно соответствует температура фазового перехода. Фазовый переход первого рода можно охарактеризовать удельной теплотой перехода. Так, переход жидкой среды в парообразную характеризуется удельной теплотой парообразования. Величина λ , численно равная количеству теплоты, необходимой для превращения единицы массы жидкости при температуре кипения в пар той же температуры, называется удельной теплотой парообразования. Такое же количество энергии выделяется в процессе конденсации единицы массы пара.

В данной работе удельная теплота парообразования воды определяется путем нахождения удельной теплоты конденсации пара. При испарении вылетают более быстрые молекулы, что приводит к понижению температуры жидкости. Для поддержания постоянной температуры необходимо подводить энергию извне.

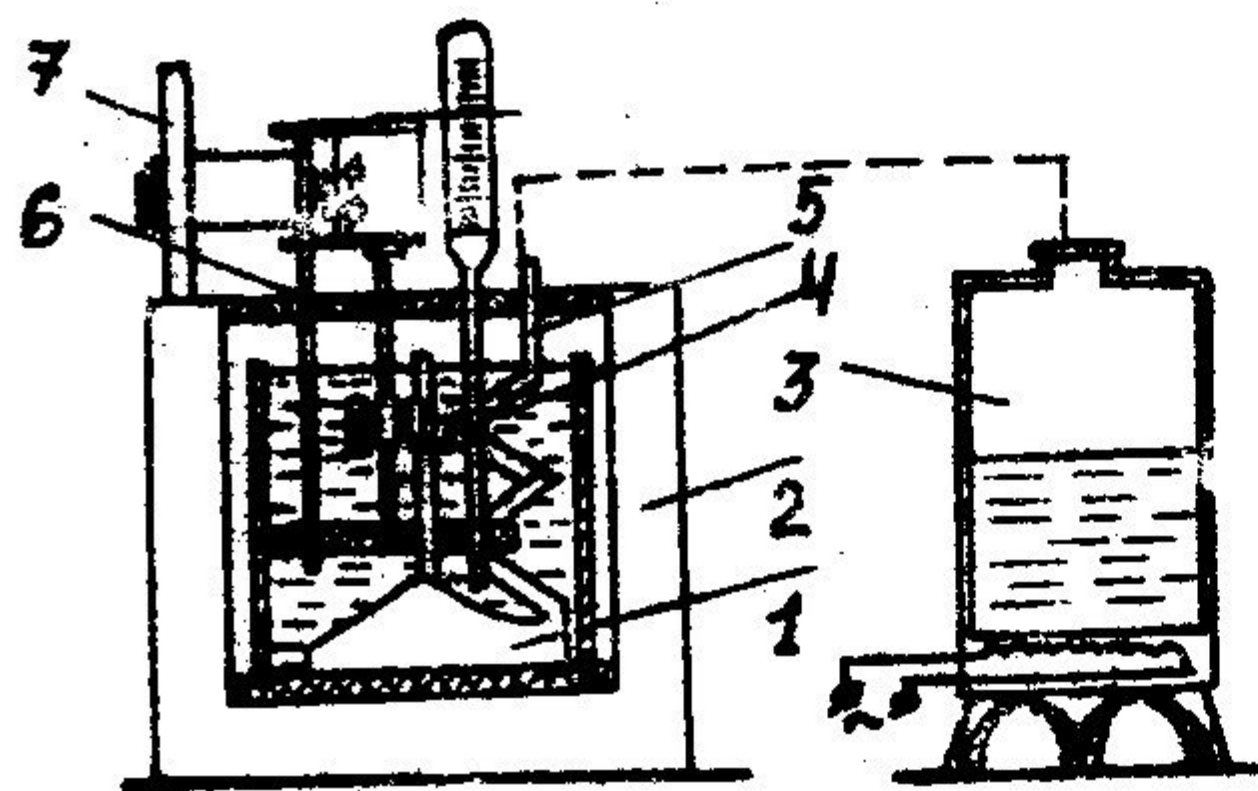
За счет кинетической энергии вылетающих молекул совершается работа, во-первых, против сил, действующих в поверхностном слое, $p_0 \bar{f} r$ (p_0 - число молекул в единице массы; $\bar{f}$ - средняя величина поверхностных сил; r - расстояние, на котором действуют эти силы), во-вторых, против внешнего давления, так как испарение сопровождается увеличением удельного объема вещества. Если испарение происходит при постоянном внешнем давлении p , то работа против внешнего давления равна $p(V_n - V_{ж})$, где V_n и $V_{ж}$ - удельный объем пара и жидкости (удельным объемом называют объем, занимаемый единицей массы вещества).

Таким образом,

$$\lambda = p_0 \bar{f} r + p(V_n - V_{ж}).$$

Из полученного выражения следует, что удельная теплота парообразования уменьшается с ростом температуры. Действительно, с повышением температуры растет плотность насыщенного пара у поверхности жидкости, что приводит к уменьшению (компенсации) сил, действующих в поверхностном слое и, следовательно, к уменьшению первого слагаемого $\rho_0 \bar{f} \Gamma$.

Кроме того, при повышении температуры уменьшается разность удельных объемов ($V_{\text{п}} - V_{\text{ж}}$) жидкости и пара, т.е. уменьшается второе слагаемое. При критической температуре теплота испарения становится равной нулю. В данной работе определяется удельная теплота парообразования воды при атмосферном давлении. Основным элементом установки, с помощью которого выполняется работа, является калориметр (см. рисунок).



Он представляет собой металлический цилиндр, вставляемый в теплоизолирующий кожух 2 с крышкой, которые предотвращают утечки теплоты. На теплоизолирующем кожухе укреплена стойка 7, на которой с помощью подвижного кронштейна крепятся мотор с мешалкой 6 и термометр. Внутри калориметра помещается змеевик 5, вваренный в

коробку-сборник 1, служащую для сбора сконденсировавшегося пара (конденсата). В коробку-сборник также вварена вентиляционная трубка 4. Водяной пар получают в кипятильнике 3, нагрев осуществляется с помощью электрической плитки.

Пар при температуре кипения, проходя по змеевику, конденсируется в нем, а затем сконденсировавшаяся жидкость охлаждается.

Выделившаяся при этом теплота подводится к калориметру, воде в нем и погруженным в воду деталям.

Методика выполнения работы

1. Проверив, наполнен ли кипятильник водой, включить электрическую плитку в сеть.
2. Взвесить пустой калориметр.
3. Взвесить воду в количестве 2,5-3,0 кг и заполнить ею калориметр.

4. Взвесить хорошо просушенный змеевик и установить его в калориметр. Накрыть калориметр крышкой.

5. Когда из соединительной резиновой трубки, надетой на патрубков кипятильника, начнет выделяться интенсивная струя пара, включить мотор мешалки и замерить начальную температуры воды в калориметре. Эта температура равна температуре калориметра со всеми находящимися в нем деталями.

6. Непосредственно после измерения начальной температуры соединить резиновую трубку кипятильника со змеевиком.

7. Когда температура воды в калориметре повысится на 8-10°C, отключить пар и после непродолжительного перемешивания воды измерить конечную температуру системы и выключить мотор мешалки.

8. Вынув змеевик из калориметра, тщательно обтереть его снаружи и взвесить. Очевидно, разность начального и конечного результатов взвешивания змеевика даст массу сконденсировавшегося пара.

Приняв во внимание, что теплоемкость калориметра, мешалки и термометра $K = 473 \text{ Дж/К}$, удельная теплоемкость змеевика $C_2 = 500 \text{ Дж/(кг·К)}$, на основе закона сохранения энергии составить уравнение теплового баланса, из которого определить искомую величину λ . Теплоемкость воды берется из табл. I Приложения 2 по ее средней температуре.

Погрешность в измерениях массы жидкости в калориметре и конденсата следует принимать по массе наименьшего разноравеса в соответствии с числом взвешиваний.

Погрешность определения удельной теплоты парообразования определяют методом дифференцирования.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. -М.: Наука, 1968, т. I, с. 391-393.
2. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. -М.: Физматгиз, 1962, т. I, с. 328-331.

Лабораторная работа М-9 ПРОВЕРКА ЗАКОНОВ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Ц е л ь р а б о т ы - изучение основных законов газового состояния на модели идеального газа.

Газ называется и д е а л ь н ы м , если размерами молекул и силами взаимодействия между ними можно пренебречь. Молекулы газа находятся в непрерывном хаотическом движении. Состояние газа однозначно определяется параметрами p, V, T и числом молей (киломолей) m/μ газа, связь между которыми дается уравнением состояния идеального газа Менделеева - Клапейрона $pV = (m/\mu)RT$ (R - универсальная газовая постоянная). Изменение состояния газа обуславливается изменением одного или нескольких параметров, но связь между ними в виде этого уравнения должна выполняться в каждый момент времени, т.е. в каждый момент времени должны существовать определенные значения этих параметров. Из уравнения Менделеева - Клапейрона можно получить, как частные случаи, уравнения, описывающие бесконечно медленные изменения состояния газа в различных условиях, т.е. различные процессы, происходящие в газе.

1. Закон Бойля - Мариотта (при $T = \text{const}$):

$$pV = \text{const}, \text{ т.е. } p_1 V_1 = p_2 V_2 .$$

Произведение давления на объем есть величина постоянная для данной массы газа.

2. Закон Гей-Люссака (при $p = \text{const}$):

$$V = \frac{m}{\mu} \frac{R}{p} T = V_0 \alpha T,$$

где $\alpha = 1/273 \text{ K}^{-1}$ - коэффициент объемного расширения газа;

V - объем газа при $T = 273 \text{ K}$.

Объем данной массы идеального газа при постоянном давлении увеличивается на $1/273$ его первоначального объема при повышении температуры на 1 град.

Традиционная запись закона:

$$V = V_0(1 + \alpha t); \quad \left[V = V_0 \alpha T = V_0 \frac{273+t}{273} = V_0(1 + \alpha t) \right].$$

3. Закон Шарля (при $V = \text{const}$)

$$p = \frac{m}{\mu} \frac{R}{V} T = p_0 \alpha T,$$

где p_0 - давление газа при $T = 273 \text{ K}$.

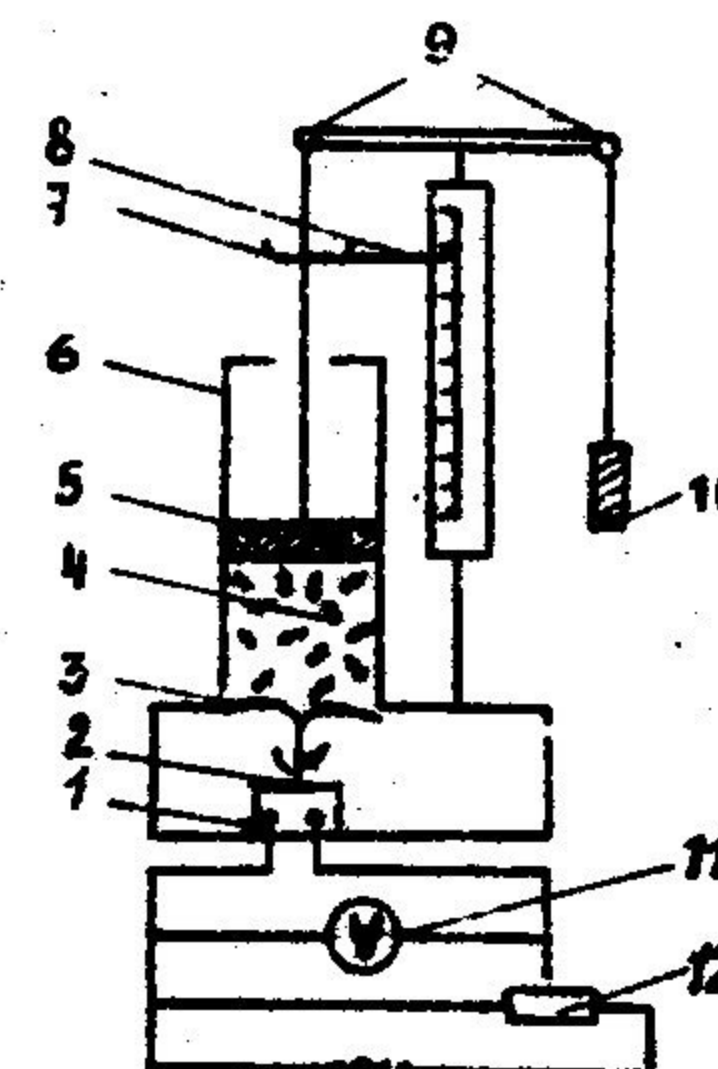
Давление данной массы идеального газа при постоянном объеме увеличивается на $1/273$ его первоначального давления при повышении температуры на 1 град.

Традиционная запись закона:

$$p = p_0(1 + \alpha t).$$

Проверка указанных законов осуществляется с помощью установки, показанной на рисунке.

Роль молекул газа в данной модели играют шарики 4, находящиеся в прозрачном цилиндре 6 с вращающимся дном 3. Вращающееся дно выполнено в виде диска с фигурными вырезами, насаженного на вал 2 электродвигателя I, который позволяет менять частоту вращения диска в зависимости от нагрузки. Электродвигатель включается в сеть через трансформатор по схеме потенциометра.



Энергия, потребляемая установкой, пропорциональна мощности двигателя. Мощность его измеряют ваттметром, но так как величина тока в данной работе по сравнению с напряжением меняется незначительно, то ваттметр можно заменить вольтметром. Тогда энергия, потребляемая установкой, пропорциональна напряжению на входе электродвигателя, которое измеряется с помощью вольтметра II. Регулируется напряжение потенциометром I2.

При вращении фигурного диска шарики выталкиваются вверх, приходя, вследствие столкновения друг с другом и со стенками сосуда, в состояние хаотического движения. Энергия этого движения возникает за счет энергии вращающегося диска, т.е. за счет энергии, потребляемой электродвигателем. Приблизительно можно считать, что энергия поступательного движения пропорциональна напряжению. Как известно, энергия хаотического поступательного движения газа определяет его температуру, поэтому в данной установке мерой температуры газа служат показания вольтметра.

В процессе хаотического движения шарики, ударяясь о поршень 5, будут производить на него давление, перемещая его вверх. При этом объем, в котором движутся шарики, - "объем газа" будет возрастать. Изменение объема фиксируется с помощью стрелки 8. Пор-

шень подвешен на нити, перекинутой через системы блоков 9, к другому концу нити подвешен груз 10, уравнивающий поршень. Площадка 7 служит для помещения грузов, позволяющих создавать "внешнее давление". Мерой давления служит вес грузов, помещенных на площадку.

В одном киломоле газа содержится $N_A = 6,02 \cdot 10^{26}$ молекул. Такое большое число молекул обеспечивает высокое постоянство основных параметров газа: давления, объема, температуры. В модели газа, содержащей всего около сотни шариков, справедлив статистический характер основных параметров. Так, при постоянном давлении (неизменное число грузов на площадке 7) и постоянной температуре (постоянное напряжение на вольтметре) стрелка 8 испытывает колебания около среднего значения. Для снятия отсчета следует отметить наибольшее и наименьшее показания, а затем взять среднее значение.

Методика выполнения работы

1. Проверка закона Бойля - Мариотта производится следующим образом. При постоянном напряжении (около 40-50 В) на площадку 7 последовательно (по одному) укладывается несколько грузов (пять-семь). Одновременно отмечаются соответствующие показания стрелки 8. Данные сводятся в таблицу типа табл. I.

Т а б л и ц а I

Число грузиков (давление)	Положение стрелки (объем)		
	V_{min}	V_{max}	V_{cp}

Затем строится график, где по оси X откладывается объем, а по оси Y - число грузиков (давление газа).

2. Проверка закона Гей-Люссака выполняется следующим образом: на площадку 7 помещается постоянный груз; следует менять напряжение в интервале 30-50 В, отмечая через 4-5 В положение стрелки 8. Данные сводятся в таблицу типа табл. 2

Т а б л и ц а 2

Напряжение (температура газа)	Положение стрелки (объем)		
	V_{min}	V_{max}	V_{cp}

Затем строится график, где по оси X откладывается напряжение, а по оси Y - объем.

3. Проверка закона Шарля производится следующим образом. Уложив на площадку 7 грузик, отмечают положение стрелки 8 при напряжении около 30 В. Затем на площадку 7 укладывают еще один грузик, а напряжение повышают таким образом, чтобы стрелка 8 вернулась в прежнее положение, и т.д. Данные сводятся в таблицу типа табл. 3.

Затем строится график, где по оси X откладывается напряжение, а по оси Y - число грузов. Ошибки не вычислять.

Т а б л и ц а 3

Число грузиков (давление)	Напряжение (температура)

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. - М.: Физматгиз, 1971, т. I, с. 249-250.
2. Сущеский М.М. Курс физики. - М.: Наука, т. I, 1975, с. 189-191.

Лабораторная работа М-10 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ДЛЯ ВОЗДУХА ПО МЕТОДУ КЛЕМАНА И ДЕЗОРМА

Ц е л ь р а б о т ы - изучение закономерностей изопроцессов, протекающих в газах; определение отношения теплоемкостей C_p/C_v .

М о л я р н о й (или мольной) т е п л о е м к о с т ь ю называется величина, численно равная количеству теплоты, которое надо сообщить одному-молю вещества для повышения его температуры на 1 К.

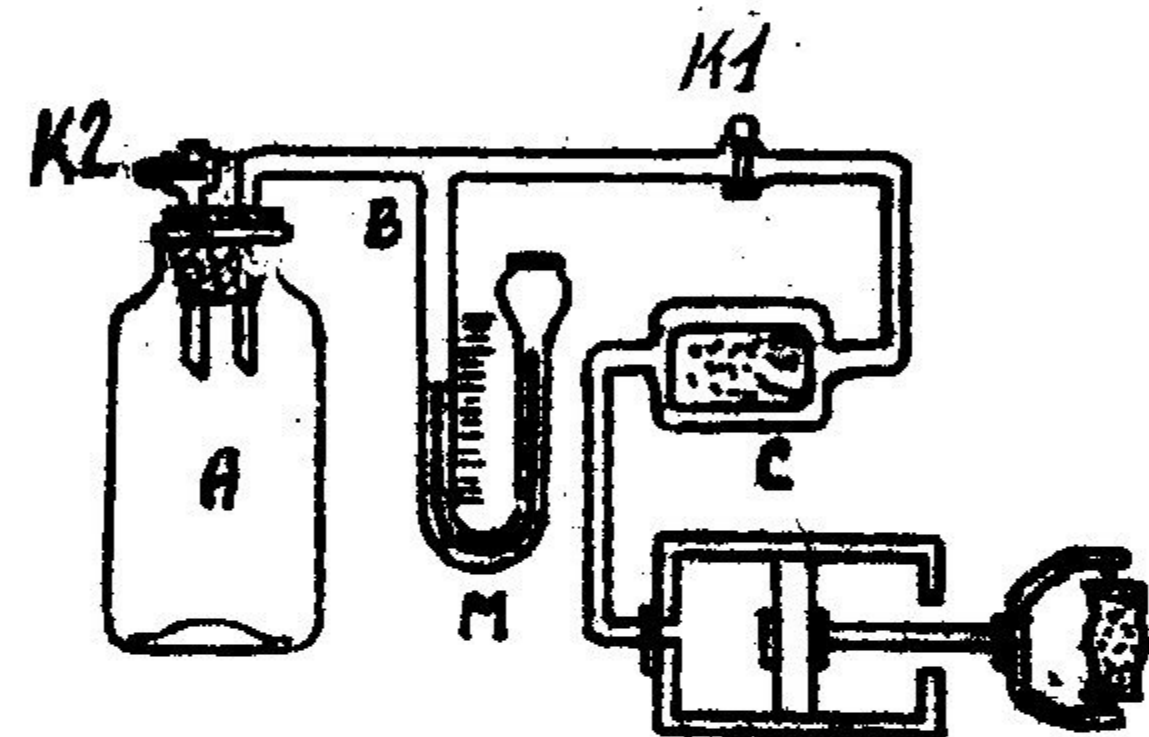
Теплоемкость тела массой в 1 кг называется у д е л ь н о й т е п л о е м к о с т ь ю c . Очевидно, что $C = \mu c$, где μ - молярная масса вещества.

Теплоемкость зависит от процессов изменения состояния газа. Если процесс в газе протекает при постоянном объеме ($V = const$),

то он называется **и з о х о р и ч е с к и м**. В этом случае газ не совершает работы против внешних сил, и теплота, полученная газом, идет только на увеличение внутренней энергии. При этом молярная изохорическая теплоемкость $C_v = (M/m) \times (dQ/dT)$. При нагревании газа при постоянном давлении ($p = \text{const}$) газ расширяется, сообщаемая ему извне теплота идет не только на увеличение запаса его внутренней энергии, но и на совершение работы против внешних сил, поэтому изобарическая теплоемкость газа больше его изохорической теплоемкости. Для молярной теплоемкости C_p справедливо уравнение Майера $C_p = C_v + R$.

Следовательно, отношение $\gamma = C_p/C_v$ всегда больше единицы.

Для определения отношения теплоемкостей используется экспериментальная установка (см. рисунок), состоящая из стеклянного



баллона А, который сообщается с трубками, ведущими к ручному насосу (на рисунке не показан), к манометру М, кран К2 позволяет сообщать баллон с атмосферой, кран К1 сообщает баллон с насосом. Избыточное, по сравнению с атмосферным, давление воздуха в баллоне А измеряется U-образным манометром, заполненным жидкостью.

Если в закрытый стеклянный баллон накачать воздух до давления p_1 , несколько превышающего атмосферное давление p_0 (температура газа при этом будет равна комнатной температуре T_1), а затем открыть кран К2, сообщая баллон с атмосферой, то давление газа начнет уменьшаться, уравниваясь с атмосферным. Температура его несколько понизится из-за быстрого расширения, так как в этом случае нет теплообмена между воздухом в баллоне и окружающей средой. Работа по расширению воздуха будет происходить за счет убыли его внутренней энергии. Процесс, происходящий без теплообмена между газом и окружающей средой, называется **а д и а б а т и ч е с к и м** и подчиняется закону Пуассона

$$pV^\gamma = \text{const}, \quad (I)$$

где $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$.

Если теплопроводность стенок баллона мала (стекло обладает низкой теплопроводностью), а отверстие крана К2 достаточно велико, то равновесие по давлению устанавливается значительно быстрее, чем равновесие по температуре, и через некоторое время температура в баллоне снова приблизится к комнатной.

Используя уравнение Клапейрона, выражение (I) можно записать в виде

$$\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^\gamma; \quad (2)$$

заметим, что в конце адиабатического расширения $p_2 = p_0$, а температура T_2 оказывается несколько ниже комнатной температуры T_1 .

После того как кран К2 вновь отключает баллон от атмосферы, происходит медленное изохорное нагревание газа в баллоне за счет теплообмена с окружающей средой. Система достигает равновесия. Установившаяся температура в баллоне T_3 равна комнатной температуре T_1 . Процесс выравнивания температуры при закрытом кране подчиняется закону Гей-Люссака

$$\frac{p_2}{T_2} = \frac{p_3}{T_3};$$

если $T_3 = T_1$, то $\frac{p_2}{T_2} = \frac{p_3}{T_1}$. (3)

Исключая из (2) отношение температур T_1/T_2 с помощью (3), найдем

$$\left(\frac{p_3}{p_2}\right)^\gamma = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\gamma-1}.$$

Решим это уравнение относительно γ :

$$\gamma = \frac{\ln \frac{p_1}{p_2}}{\ln \frac{p_1}{p_3}} = \frac{\ln \frac{p_1}{p_0}}{\ln \frac{p_1}{p_3}} = \frac{\ln p_1 - \ln p_0}{\ln p_1 - \ln p_3}.$$

Введем обозначения $p_1 = p_0 + \rho g h_1$; $p_3 = p_0 + \rho g h_2$.

Разложим логарифмы в ряд; так как $h_1 \ll p_0$ и $h_2 \ll p_0$, то можно ограничиться двумя первыми членами разложения:

$$\ln p_1 = \ln(p_0 + \rho g h_1) = \ln p_0 \left[1 + \frac{\rho g h_1}{p_0}\right] = \ln p_0 + \ln\left(1 + \frac{\rho g h_1}{p_0}\right) = \ln p_0 + \frac{\rho g h_1}{p_0}.$$

$$\ln p_3 = \ln(p_0 + \rho g h_2) = \ln p_0 + \frac{\rho g h_2}{p_0}$$

Следовательно,

$$\gamma = \frac{\ln p_0 + \frac{\rho g h}{p_0} - \ln p_0}{\ln p_0 + \frac{\rho g h_1}{p_0} - \ln p_0 - \frac{\rho g h_2}{p_0}} = \frac{h_1}{h_1 - h_2} \quad (4)$$

Таким образом, определение γ сводится к измерению разности уровней в манометре h_1 и h_2 .

Методика выполнения работы

1. Открыть кран $K1$ при герметически закрытом кране $K2$ и насосом накачать воздух в баллон до давления, превышающего атмосферное на 10-25 см вод.ст., и перекрыть кран $K1$.

2. Выполнить отсчет разности уровней в манометре.

3. На короткое время открыть кран $K2$ и, как только уровни жидкости в манометре сравняются, быстро закрыть его.

4. Выждать 2-3 мин, пока температура в баллоне сравняется с комнатной, т.е. прекратится перемещение уровней в манометре, и измерить избыточное давление.

5. Подсчитать γ по формуле (4). Опыт нужно проделать пять-шесть раз, повторяя все операции в указанном порядке.

Данные опытов свести в таблицу:

Номер опыта	h_1	h_2	γ	$\Delta\gamma$
I				
2				
...				
Среднее значение			$\gamma_{cp} =$	$\Delta\gamma_{cp} =$

Найдя среднее значение γ , оценить погрешность измерения по среднему.

1. Савельев И.В. Курс общей физики. -М.: Наука, 1977, т. I, с.341-350.

2. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. -М.: Физматгиз, т. I, 1962, с.180-188, 268-273.

3. Шубин А.С. Курс общей физики. -М.: Высшая школа, 1976, с.110-126.

Лабораторная работа М-II ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМОСТИ МЕТАЛЛА МЕТОДОМ ОХЛАЖДЕНИЯ

Цель работы - получение графической зависимости удельной теплоемкости твердого тела от температуры на основе изучения явления охлаждения нагретого тела в условиях естественной конвекции.

Любое нагретое тело охлаждается, если его поместить в среду, температура которой ниже температуры тела. Скорость охлаждения тела, равная производной от температуры по времени $\partial T / \partial t$, в каждый момент будет различна. Очевидно, количество теплоты, отданное телом при охлаждении за малый промежуток времени Δt ,

$$\Delta Q = cm \frac{\partial T}{\partial t} \Delta t, \quad (1)$$

где c - удельная теплоемкость тела

m - масса тела.

Это же количество теплоты можно определить по формуле Ньютона

$$\Delta Q = \alpha (T - T_0) \Delta S \Delta t, \quad (2)$$

где α - коэффициент теплоотдачи, величина которого зависит от многих факторов (формы тела, свойств охлаждающей среды, скорости движения среды и т.д.);

ΔS - поверхность тела;

$T - T_0$ - разность температур тела и окружающей среды.

Из (1) и (2) можно найти удельную теплоемкость

$$c = \frac{\alpha (T - T_0) \Delta S}{m \frac{\partial T}{\partial t}}$$

Если взять два тела (образца) из разных металлов, но одинаковой формы и размеров ($\Delta S_1 = \Delta S_2$), которые будут охлаждаться в одинаковых условиях, например в условиях естественной конвекции ($\alpha_1 = \alpha_2$), и при одинаковой температуре T , то

$$\frac{c_x}{c} = \frac{m \frac{\partial T}{\partial t}}{m_x \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_x},$$

откуда

$$c_x = c \frac{m}{m_x} \frac{\frac{\partial T}{\partial t}}{\left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_x} \quad (3)$$

Следовательно, для определения удельной теплоемкости исследуемого металла при определенной температуре необходимо знать удельную теплоемкость эталонного образца, скорость его охлаждения и скорость охлаждения исследуемого образца.

Установка, с помощью которой выполняется работа (~ с. I), состоит из электрической печи 1,

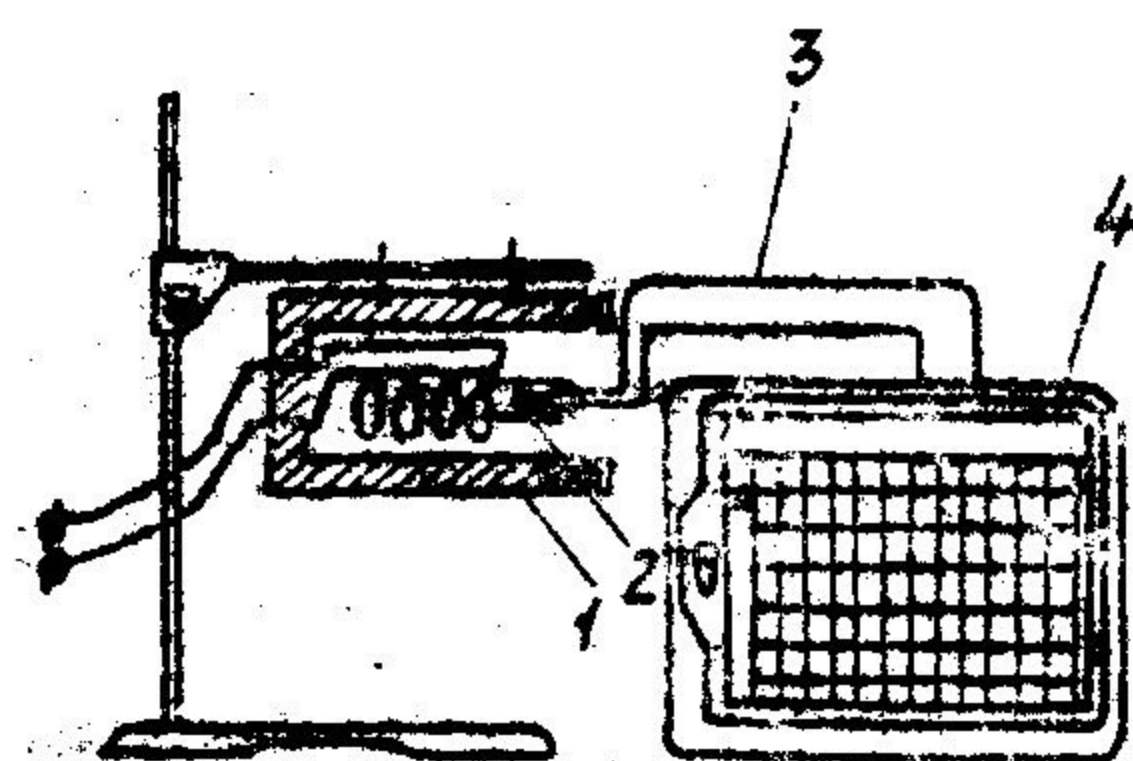


Рис. 1

эталонного и исследуемого образцов 2, электронного автоматического потенциометра ПСИ-II или ЭПП-09М и хромель-алюмелевой термопары 3. Эталонным образцом является медь.

Эталонный электрический потенциометр 4 измеряет и записывает температуру образцов с помощью термопар.

В данной работе все приемные клеммы потенциометра соединены параллельно так, что каждая точка, отмеченная на диаграммной ленте, означает температуру образца в данный момент времени.

В основу работы автоматического потенциометра положен компенсационный метод измерения напряжения. Упрощенная измерительная схема потенциометра (рис. 2) изображена в виде четырехугольного "мостика", плечи которого составляют сопротивления R_H , R_M , R_K , R_δ и калибровочный реохорд R_P . В диагональ "моста" CD подключен источник постоянного тока E . Напряжение в другой диагонали моста AB зависит от положения движка B на реохорде.

Для измерения ЭДС E_x термопары она включается в диагональ моста последовательно с чувствительным нуль-индикатором, причем E_x направлена навстречу напряжению измерительной схемы в точках A и B .

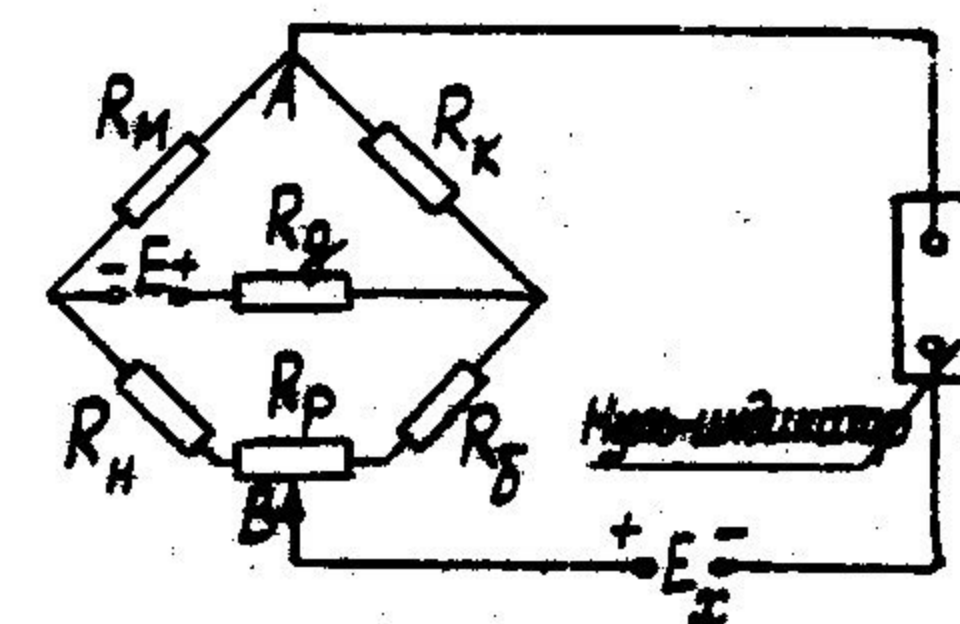


Рис. 2

Для каждого значения E_x можно найти такое положение движка на реохорде, когда ток в диагонали AB будет равен нулю. Это соответствует равенству ЭДС термопары и напряжению схемы в точках A и B . Таким образом, каждому значению E_x соответствует вполне определенное положение движка и жестко связанного с ним указателя.

В приборе уравнивание неизвестного напряжения E_x производится автоматически при помощи электронного усилителя, включенного в диагональ схемы вместо нуль-индикатора. Если значение E_x измеряемой ЭДС не равно напряжению схемы в точках A и B , то некомпенсированное напряжение постоянного тока подается на вход усилителя, где усиливается до величины, достаточной для приведения в действие реверсивного двигателя. Реверсивный двигатель, вращаясь, передвигает подвижный контакт по реохорду до наступления равновесия в схеме. Когда двигатель останавливается, движок реохорда и указатель занимают положение, соответствующее измеряемой ЭДС.

Дальнейшее изменение ЭДС снова вызывает вращение двигателя и перемещение движка реохорда и указателя. Таким образом, в электронных автоматических потенциометрах измерительное устройство следит за изменением измеряемой величины.

В многоточечном приборе имеется переключатель, автоматически подключающий к измерительной схеме по очереди все присоединенные к прибору датчики. После наступления компенсации печатающий механизм отпечатывает точку с порядковым номером того датчика, ЭДС которого в данный момент измеряется. Таким образом, измерение и запись производятся автоматически.

Методика выполнения работы

I. С разрешения преподавателя включить в сеть потенциометр и перевести переключатель, расположенный на лицевой стороне крон-

штейна прибора (см. рис. I, поз. 4) в положение "Измерение". Прогреть электронные лампы в течение 10-15 мин.

2. Поместить в печь эталонный образец со вставленной в него термопарой и включить в печь. Следить за показанием стрелки на шкале потенциометра, отградуированной в градусах Цельсия.

3. Когда температура образца достигнет 400°C , переключатель потенциометра перевести в положение "Измерение, запись".

4. При достижении температуры 600°C вытянуть эталонный образец (медный) с термопарой из печи для охлаждения. После остывания образца до 40°C переключатель потенциометра перевести в положение "Измерение". На диаграммной ленте в результате этого получится запись температуры в зависимости от времени при нагревании (от 400 до 600°C) и остывании (от 600 до 40°C) эталонного образца.

5. Аналогичную запись получить для исследуемого образца.

6. По нижней "стале-линейке" потенциометра на диаграммной бумаге отметить точками значения температуры: 0; 50; 100; 150;...; 600°C .

7. Перенести эти точки на кривые охлаждения для образцов.

8. С разрешения преподавателя вырезать часть диаграммной ленты с записью процессов нагревания и охлаждения образцов.

9. Определить тангенс угла наклона касательных в точках, оговоренных в п. 7, либо непосредственно проведя касательные, либо по методу зеркала, суть которого состоит в следующем.

К точке O (рис. 3) кривой, в которой необходимо определить

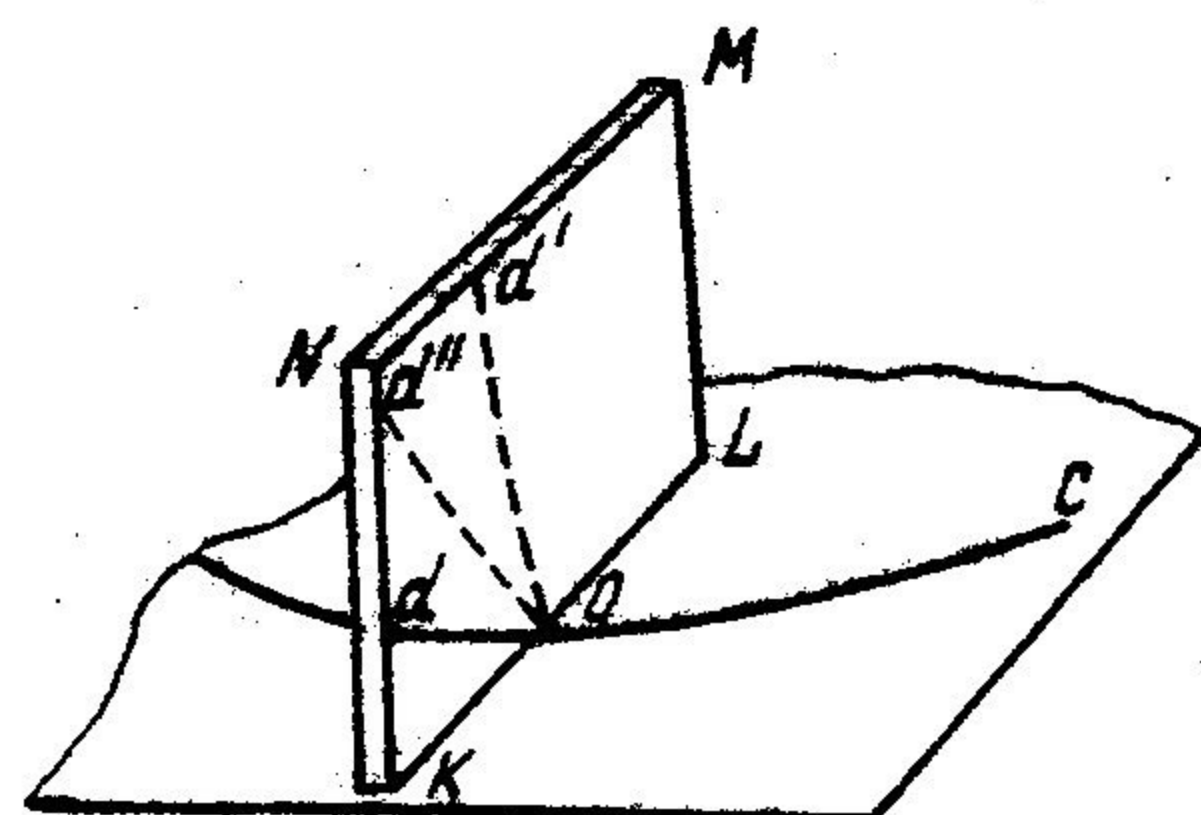


Рис. 3

угол наклона касательной, подводится небольшое прямоугольное зеркало так, чтобы видеть отражение oa' кривой oc (зеркало должно лежать на чертеже стороной KL , а сторона ML почти перпендикулярна плоскости чертежа). Поворотом зеркала добиваются того, чтобы отражение линии oa' и сама линия oc плавно соприкасались друг с другом. В этом случае сторона зеркала будет совпадать с нормалью в точке O . На рисунке отражение oa' или oa'' соответствует неправильному расположению зеркала. Для облегчения на-

хождения угла наклона касательной зеркало прикреплено к вертикальной линейке чертежного прибора. После правильной установки зеркала в той или иной точке кривой угол наклона касательной определяют по лимбу, цена деления которого 1 град. Перед началом определения углов диаграммную ленту необходимо так закрепить на чертеже, чтобы вертикальная линейка чертежного прибора была параллельна оси температур (при установке лимба на нулевое деление).

Значения найденных тангенсов углов наклона касательных пропорциональны скорости охлаждения, причем коэффициенты пропорциональности для обоих образцов одинаковы.

Вычисление удельной теплоемкости исследуемого образца при различных температурах выполнить по формуле (3).

Массы образцов m и m_x определить взвешиванием; удельную теплоемкость меди найти по табл. 2 Приложения I. Результаты измерений и обработку опытных данных свести в таблицу:

Температура $T, ^{\circ}\text{C}$	Теплоемкость меди $c, \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	Значения тангенсов углов наклона касательных (скорость охлаждения образцов)		Теплоемкость исследуемого образца $c_x, \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
		медного $\frac{\partial T}{\partial t}$	исследуемого $\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_x$	
50				
100				
150				

Построить график зависимости $c_x = f(t)$.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. С а в е л ь е в И. В. Курс общей физики. - М.: Наука, 1968, т. I, с. 374-376.

2. Ф р и ш С. Э., Т и м о р е в а А. В. Курс общей физики. - М.: Физматгиз, 1962, т. I, с. 363-367.

Лабораторная работа М-12
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ИСПАРЕНИЯ ЖИДКОСТИ И ИЗМЕНЕНИЯ
ЕЕ ЭНТРОПИИ

Цель работы: изучение явления испарения, ознакомление с методикой работы на аналитических весах.

Скорость испарения называется физическая величина, численно равная массе жидкости, испаряющейся с единицы свободной поверхности жидкости за единицу времени. Если масса жидкости, испарившейся за некоторый промежуток времени t , равна m , а диаметр цилиндрического сосуда d , то скорость испарения

$$v = \frac{4m}{\pi d^2 t} \quad (I)$$

Испарение возможно при любой температуре, но с возрастанием температуры, т.е. с ростом интенсивности теплового движения, скорость испарения увеличивается. Она зависит также от скорости диффузии, от наличия конвекционных токов и т.д.

Качественным отличием теплового движения является его хаотичность, поэтому для характеристики теплового движения следует ввести количественную меру степени молекулярного беспорядка.

Любое состояние системы в целом (макросостояние) характеризуется средними значениями параметров: давления p , объема V и температуры T . Оно представляет собой непрерывную смену микросостояний, отличающихся друг от друга распределением энергии между молекулами и распределением этих молекул в различных частях объема. Число W непрерывно сменяющих друг друга микросостояний и определяет степень молекулярного беспорядка системы. Это число называют термодинамической вероятностью системы.

Термодинамическая вероятность связана с энтропией системы соотношением, установленным Больцманом,

$$S = K \ln W,$$

где K — постоянная Больцмана, $K = 1,3804 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Энтропия является функцией состояния системы, т.е. не зависит от пути перехода в это состояние.

Если телу в каком-либо процессе сообщить некоторое количество

теплоты ΔQ , то возрастает энергия теплового движения его молекул и появятся новые микросостояния с большими значениями энергии отдельных молекул. Увеличение возможных состояний W приведет к возрастанию энтропии тела на величину ΔS .

Клаузиус показал, что изменение энтропии тела численно равно отношению теплоты ΔQ , сообщенной телу, к абсолютной температуре T этого тела:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}.$$

При испарении из жидкости вырываются наиболее быстрые молекулы, в результате чего температура ее понижается. При отсутствии тепловой изоляции с достаточной степенью приближения можно считать, что количество теплоты, которое нужно сообщить, и потерянное жидкостью при испарении, восстанавливается за счет притока теплоты из внешней среды и процесс протекает изотермически.

Исходя из того, что удельная теплота испарения r численно равна количеству теплоты, которое нужно сообщить единице массы жидкости, находящейся при температуре T , чтобы перевести ее в пар той же температуры, можно определить количество теплоты ΔQ , полученное жидкостью от окружающего воздуха:

$$\Delta Q = mr.$$

Тогда изменение энтропии жидкости за единицу времени при испарении

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{mr}{Tt}, \quad (2)$$

где T — абсолютная температура, при которой производится опыт.

Методика выполнения работы

1. Ознакомившись с инструкцией к использованию аналитических весов (см. работу М-1), проверить установку весов и определить цену деления их шкалы. Затем на левую чашку весов поставить стаканчик со спиртом, а на правую — разновески.

2. Записав начальный вес стаканчика со спиртом с точностью до 10 мг, включить секундомер и в течение 20 мин (через каждую минуту) фиксировать положение визирной линии на шкале весов. Начальный (нулевой) отсчет по шкале весов произвести в момент включения секундомера. Все опыты следует производить при открытых дверцах футляра весов.

х) Механика: Методические указания к лабораторным работам по курсу физики /Под общ. ред. Н.Г.Грипича. — Николаев, НКМ, 1985.

Для того чтобы хватило шкалы для проведения всего опыта, наблюдение следует начинать, когда визирная линия будет находиться в правом крайнем положении (8-10-е деление положительной части шкалы). Если визирная линия дойдет до десятого деления отрицательной шкалы меньше чем за 20 мин, весы нужно арретировать, уменьшить с помощью малого лимба нагрузку на 20-30 мг, снова опустить арретир и продолжать измерения. Вся эта операция должна занять не больше одной минуты.

3. По окончании работы с аналитическими весами в пяти местах измерить внутренний диаметр стаканчика. Удельную теплоту испарения при температуре опыта находят по табл. I Приложения 2. Данные измерений свести в таблицы типа табл. I и 2.

Т а б л и ц а I

Время с начала отсчета t , мин	Положение визирной линии k	Смещение визирной линии за минуту Δk	Отклонение Δk от среднего смещения $\Delta(\Delta k)$	Диаметр стаканчика d	Абсолютная ошибка измерения диаметра Δd
1					
2					
...					
Среднее		$\Delta k_{cp} =$	$\Delta(\Delta k)_{cp} =$	$d_{cp} =$	$\Delta d_{cp} =$

Т а б л и ц а 2

Цена деления шкалы весов	Начальная масса стаканчика с жидкостью	Конечная масса стаканчика с жидкостью	Температура окружающей среды	Удельная теплота испарения	Атмосферное давление
36	58.98	58.574	21	25.105	7615

4. По формуле (1) вычислить скорость испарения.

5. По формуле (2) определить изменение энтропии исследуемой жидкости за одну секунду.

Погрешность скорости считать методом логарифмирования.

Для упрощения расчетов можно определить среднее смещение визирной линии за одну минуту, а затем, умножив его на цену деления шкалы, вычислить среднюю массу испарившейся жидкости в этот промежуток времени. Погрешность массы испарившейся жидкости вы-

числить методом усреднения. Для этого методом усреднения определить погрешность смещения визирной линии за одну минуту, а затем умножить ее на цену деления шкалы.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. С а в е л ь е в И.В. Курс общей физики. - М.: Наука, 1968, т. I, с. 305-367, 391-393.
2. Ф р и ш С.Э. Курс общей физики. - М.: Физматгиз, 1962, т. I, с. 301-308, 326-328.

Лабораторная работа М-13 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРА

Ц е л ь р а б о т ы : изучение изменения коэффициента поверхностного натяжения в зависимости от концентрации жидкости.

Основные понятия, характеризующие поверхностное натяжение жидкости, приведены в работе М-14.

Коэффициент поверхностного натяжения α является одним из основных параметров жидкости и зависит от ее химического состава и температуры. Примеси сильно влияют на его величину. Это объясняется тем, что в поверхностном слое находятся молекулы растворителя и растворенного вещества. В общем случае работа, затрачиваемая на вывод их из глубины раствора в поверхностный слой, для растворителя и растворенного вещества неодинакова.

Для изменения поверхности раствора на величину ΔS нужно совершить работу

$$\Delta A = (a_1 n_1 + a_2 n_2) \Delta S,$$

где a_1 и a_2 - работа, необходимая для вывода одной молекулы растворителя и растворенного вещества в поверхностный слой;

n_1 и n_2 - соответственно числа их молекул в 1 м^2 поверхностного слоя.

Величина $\alpha = a_1 n_1 + a_2 n_2$ представляет собой коэффициент поверхностного натяжения раствора. Отсюда следует, что α раствора зависит от концентрации последнего. Значение α раствора занимает промежуточное положение между коэффициентами поверхностного натяжения растворителя и растворенного вещества.

Одним из простейших методов определения коэффициента поверхностного натяжения является метод отрыва капель.

Образование и рост капли при медленном вытекании жидкости из вертикальной трубки сопровождается возникновением так называемой шейки капли (см. рисунок). В момент, когда сила тяжести растущей капли станет равной силе $\bar{F}$ поверхностного натяжения, действующей по периметру шейки капли, происходит отрыв капли.



Условием отрыва капли является соотношение

$$P = 2\pi r \alpha, \quad (I)$$

где P - вес капли в момент отрыва;

α - коэффициент поверхностного натяжения жидкости;

r - радиус шейки капли.

Так как определение радиуса шейки капли представляет значительные трудности, то абсолютные измерения α этим методом неточны. Применяя метод сравнения, можно обойтись без измерения шейки капли.

Допустим, что имеется две жидкости с равными коэффициентами поверхностного натяжения α_x и α_g . Обозначив через m_x и m_g массы одного и того же количества капель жидкости, накапанной из одной и той же бюретки, на основании (I) запишем:

$$m_x g = 2\pi r \alpha_x n; \quad (2)$$

$$m_g g = 2\pi r \alpha_g n. \quad (3)$$

Жидкости подобраны так, чтобы радиусы шеек капель в обоих случаях можно было считать одинаковыми. Из соотношений (2) и (3) получаем

$$\alpha_x = \frac{m_x}{m_g} \alpha_g. \quad (4)$$

Коэффициент поверхностного натяжения α_g эталонной жидкости (обычно дистиллированной воды) находят по табл. I Приложения 2 в зависимости от температуры опыта. Массы m_x и m_g одного и того же количества капель эталонной и исследуемой жидкостей определяют взвешиванием.

Методика выполнения работы

I. Проверив весы, взвесить с точностью до 10 мг сухой ста-

канчик с крышкой, предварительно изучив инструкцию пользования аналитическими весами (см. работу М-1)*).

2. Налить в бюретку дистиллированную воду и над колбочкой, из которой наливали в бюретку воду, отрегулировать скорость истечения так, чтобы было удобно считать капли.

3. Заменить колбочку стаканчиком и накапать в него 40-50 капель.

4. Взвесить закрытый стаканчик с водой.

5. В тот же стаканчик с водой накапать еще 20-25 капель воды (предварительно отрегулировав скорость истечения над колбочкой) и снова взвесить.

6. Повторить указанное в п.5.

7. Опыт, аналогичный описанному в пп.2-6, провести с каждым из исследуемых растворов при том же количестве капель, что для воды.

8. По формуле (4) вычислить коэффициенты поверхностного натяжения исследуемых растворов. При этом следует учесть массу пустого стаканчика; для вычисления каждого из значений использовать результаты взвешивания одинакового количества капель эталонной и исследуемой жидкостей.

9. Погрешности α_x для каждого из растворов определить методом усреднений. Погрешность концентрации ΔC считать равной 1%.

10. Построить точки на графике зависимости α_x раствора от его концентрации $\alpha_x = f(C)$, откладывая по оси абсцисс концентрацию C , а по оси ординат средние значения α_x каждого раствора.

11. Зная $\Delta \alpha_x$ и ΔC , построить поле ошибок и провести кривую.

12. Данные измерений и результаты их обработки свести в таблицы типа табл. I и 2.

Т а б л и ц а I

Количество капель n	Масса пустого стаканчика m_c	Масса стаканчика с жидкостями				
		M_g	M_{x1}	M_{x2}	M_{x3}	M_{x4}

Т а б л и ц а 2

Вода	C_1	C_2	C_3	C_4	$\frac{\alpha_g}{m_g}$	α_{x1}	α_{x2}	α_{x3}	α_{x4}
m_g	m_{x1}	m_{x2}	m_{x3}	m_{x4}					

* Механика: Методические указания к лабораторным работам по курсу физики/Под общ. ред. Н.Г. Грипича. - Николаев: НКИ, 1985.

Лабораторная работа М-14
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ
ЖИДКОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ТОРЗИОННЫХ ВЕСОВ

Цель работы: ознакомление с работой торзионных весов и определение коэффициента поверхностного натяжения различных жидкостей.

Молекулы поверхностного слоя жидкости, в отличие от молекул в глубине жидкости, находятся в особых условиях. Равнодействующая всех сил, действующих на молекулу внутри жидкости со стороны других молекул, равна нулю, а действующих на молекулу поверхностного слоя жидкости - отлична от нуля. Если силы, действующие на молекулу поверхностного слоя, сгруппировать по квадрантам, то эти силы дадут составляющие как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскости. Силы в вертикальной плоскости втягивают молекулу внутрь жидкости и создают молекулярное или внутреннее давление. Силы в горизонтальной плоскости вызывают стремление жидкости сократить свою поверхность. Они называются силами поверхностного натяжения и направлены по касательной к поверхности жидкости.

Для разрыва поверхности жидкости необходимо приложить внешние силы, касательные к поверхности и перпендикулярные линии разрыва. Они должны быть равными силам поверхностного натяжения, отсюда сила поверхностного натяжения запишется так:

$$F = \alpha l,$$

где α - коэффициент поверхностного натяжения, зависящий от природы жидкости и температуры;

l - линия разрыва.

Коэффициент поверхностного натяжения численно равен силе, приложенной к единице длины линии, лежащей на поверхности жидкости, и измеряется в ньютонах на метр (Н/м). Это силовая характеристика. Если внешние силы увеличивают поверхность жидкости на

dS , то против сил поверхностного натяжения производится работа

$$dA = F dx = \alpha l dx,$$

но $l dx = dS$,

тогда

$$dA = \alpha dS.$$

Из последнего выражения следует, что коэффициент поверхностного натяжения численно равен работе, необходимой для образования единицы поверхности жидкости. Это энергетическая характеристика.

Примеси сильно влияют на величину α ; это объясняется тем, что в поверхностном слое раствора есть молекулы и растворителя, и растворенного вещества. В данной работе определяют коэффициент поверхностного натяжения растворов соли и мыла, считая коэффициент поверхностного натяжения дистиллированной воды при данной температуре известным.

В торзионных весах маленькая четырехугольная пластинка со сторонами a и b опускается на поверхность жидкости. Угол φ между вертикальной поверхностью пластинки и плоскостью, касательной к поверхности жидкости на границе с телом, называется краевым углом (рис. I).

Для того чтобы оторвать пластинку от поверхности жидкости, нужно приложить силу

$$F = P + F_{\alpha},$$

где P - вес пластинки;

$F_{\alpha} = 2\alpha(a+b)\cos\varphi$ - сила поверхностного на-

тяжения, действующая по всему периметру пластинки.

Тогда

$$F = P + 2\alpha(a+b)\cos\varphi,$$

откуда

$$\alpha = \frac{F - P}{2(a+b)\cos\varphi},$$

F и P определяют с помощью торзионных (крутильных) весов, пределы измерения которых 0-500 мг. Измерить угол φ трудно, поэтому используют метод сравнения. Последнее уравнение запишем для исследуемой жидкости и воды:

$$\alpha_x = \frac{F_x - P_x}{2(a+b)\cos\varphi_x}; \quad \alpha_{H_2O} = \frac{F_{H_2O} - P_{H_2O}}{2(a+b)\cos\varphi_{H_2O}}.$$

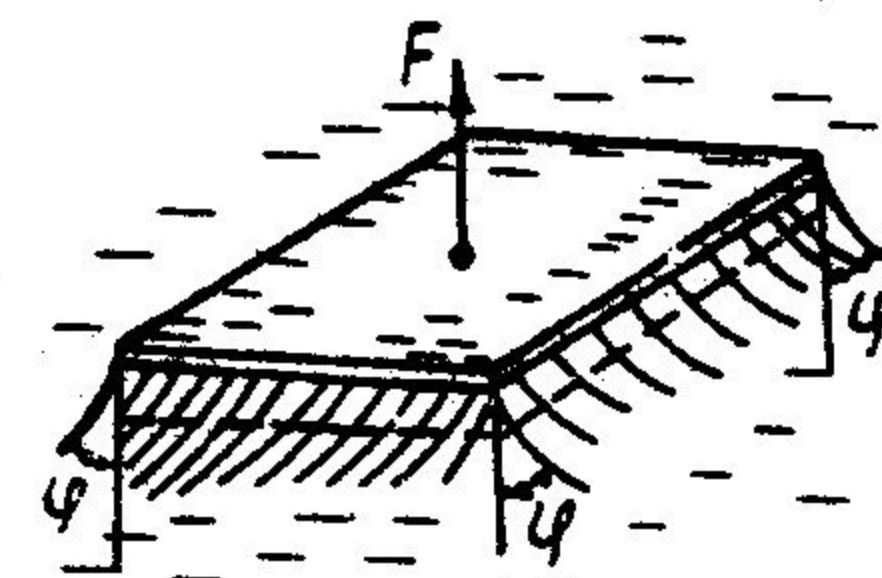


Рис. I

Делим первое равенство на второе; углы φ_x и φ_{H_2O} мало отличаются друг от друга, поэтому на $\cos \varphi$ можно сократить. В результате получим

$$\alpha_x = \alpha_{H_2O} \frac{F_x - P_x}{F_{H_2O} - P_{H_2O}},$$

P_x и P_{H_2O} - вес пластинки с капельками жидкости и воды, так как на поверхности пластинки при отрыве ее от поверхности жидкости остаются капельки, удерживаемые силами поверхностного натяжения. Вес этих капелек для различных жидкостей различен.

Величины F_x , P_x , F_{H_2O} , P_{H_2O} измеряют с помощью крутильных весов, значение α_{H_2O} при данной температуре находят из табл. I Приложения 2.

Методика выполнения работы

1. Установить весы по уровню 2 с помощью винтов I (рис.2).

2. При закрытых весах - арретир 3 в положении "Закрыто" - снять пластинку 7 с рычага 6.

3. Передвинуть арретир в положение "Открыто". Установить стрелку 5 на нуль шкалы, вращением корректора 9 совместить указатель 4 с нулевой чертой на шкале.

4. Передвинуть арретир 3 в положение "Закрыто", открыть крышку и подвесить на крючок пластинку 7.

5. На прозрачную полочку поставить стаканчик с дистиллированной водой и винтами поднять полочку до соприкосновения пластинки с поверхностью жидкости.

6. Арретир 3 передвинуть в положение "Открыто", а затем медленно передвигать рычаг 8 до момента отрыва пластинки от поверхности жидкости. Отметить силу отрыва F по шкале против стрелки 5. При обратном движении рычага 8 определить вес пластинки с каплей в момент установления указателя 4 на нуль.

7. Перед измерениями с другой жидкостью пластинку 7 высушивают фильтровальной бумагой.

8. Измерения провести для воды и всех исследуемых жидкостей три-пять раз, найти среднюю разность $F_x - P_x$ и $F_{H_2O} - P_{H_2O}$, ошибки разностей $\Delta(F_x - P_x)$ и $\Delta(F_{H_2O} - P_{H_2O})$. Результаты свести в таблицу.

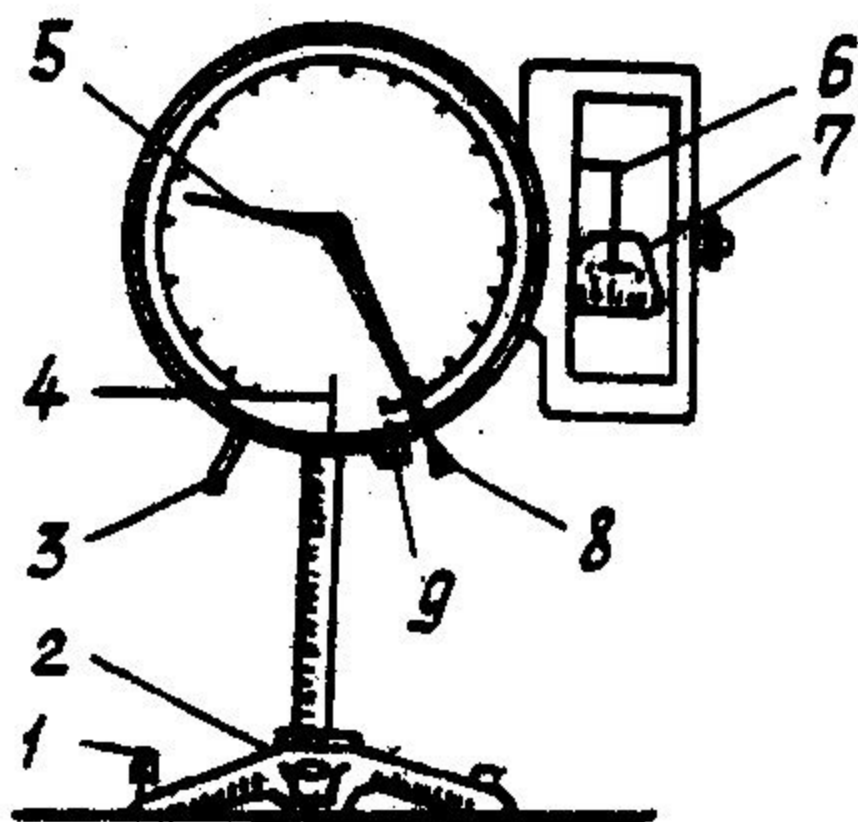


Рис.2

Вода				Жидкость I				Жидкость 2			
F_{H_2O}	P_{H_2O}	$F_{H_2O} - P_{H_2O}$	$\Delta(F_{H_2O} - P_{H_2O})$	F_{x_1}	F_{x_2}	$\Delta(F_{x_1} - P_{x_2})$	$\Delta(F_{x_1} - P_{x_1})$	F_{x_2}	P_{x_2}	$F_{x_2} - P_{x_2}$	$\Delta(F_{x_2} - P_{x_2})$

9. Подсчитать для всех жидкостей α_x . Ошибки $\Delta\alpha_x$ определить путем дифференцирования логарифма функции. $\Delta\alpha_{H_2O}$ найти по таблице.

Примечание. Раствор соли следует хорошо взбалтывать перед измерениями ($F_c > F_{H_2O} > F_m$).

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. - М.: Физматгиз, 1972, т. I, с. 212-220.

2. Савельев И.В. Курс общей физики. - М.: Физматгиз, 1977, т. I, с. 367-370.

Лабораторная работа М-15 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ МЕТОДОМ ПОДЪЯТИ ЖИДКОСТИ В КАПИЛЛЯРАХ

Цель работы: определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости и изучение капиллярных явлений.

Описание физической природы сил поверхностного натяжения приводится в работе М-II.

Вблизи стенок сосуда наблюдается искривление поверхности жидкости, вызванное тем, что молекулы жидкости, находящиеся вблизи стенки сосуда, взаимодействуют не только друг с другом, но и с частицами твердого тела.

Если силы притяжения молекул жидкости частицами стенки больше, чем силы притяжения между молекулами жидкости, жидкость смачивает стенки сосуда и мениск вогнутый (стекло - вода, рис. I, а). Если силы притяжения между молекулами жидкости больше сил притяжения их частицами стенки, жидкость не смачивает стенку сосуда и мениск выпуклый (стекло - ртуть, рис. I, б).

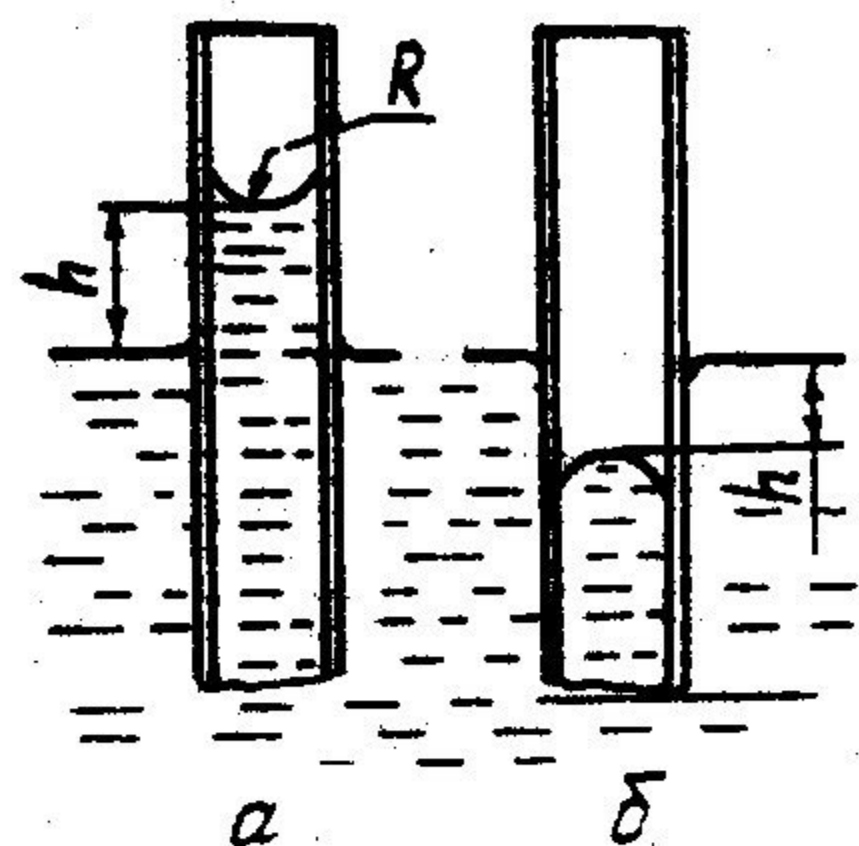


Рис. I

Благодаря действию сил поверхностного натяжения, под искривленной поверхностью жидкости возникает дополнительное давление Δp , избыточное по отношению к внешнему. Это давление направлено всегда к центру кривизны искривленной поверхности. Этим дополнительным давлением вызываются явление поднятия (см. рис. I, а) в случае смачиваемой жидкости и явление опускания (см. рис. I, б) в случае несмачиваемой. Жидкость поднимается или опускается в капилляре до тех пор, пока дополнительное давление не сравняется с гидростатическим поднявшегося или опустившегося столба жидкости.

Если считать, что жидкость полностью смачивает поверхность капилляра, то радиус кривизны мениска R совпадает с внутренним радиусом трубки r . Так как жидкость находится в состоянии равновесия, то выполняется равенство дополнительного и гидростатического давления

$$\frac{2\alpha}{r} = \rho g h, \quad (I)$$

где ρ - плотность жидкости;

h - высота ее поднятия или опускания.

Отсюда коэффициент поверхностного натяжения

$$\alpha = \frac{r \rho g h}{2}. \quad (2)$$

Применим формулу (2) к капиллярам диаметрами D_1 , D_2 и D_3 . Тогда

$$\alpha = \frac{r_1 h_1}{2} \rho g = \frac{r_2 h_2}{2} \rho g = \frac{r_3 h_3}{2} \rho g.$$

Отсюда

$$h_1 - h_2 = \frac{2\alpha}{g \rho r_1} - \frac{2\alpha}{g \rho r_2}; \quad h_1 - h_3 = \frac{2\alpha}{g \rho r_1} - \frac{2\alpha}{g \rho r_3}.$$

Следовательно,

$$\alpha = \frac{D_1 D_2}{4(D_1 - D_2)} (h_1 - h_2) \rho g = \frac{D_1 D_3}{4(D_1 - D_3)} (h_1 - h_3) \rho g = \frac{D_2 D_3}{4(D_2 - D_3)} (h_2 - h_3) \rho g,$$

но $h_1 = N_1 - N_0; \quad h_2 = N_2 - N_0; \quad h_3 = N_3 - N_0,$

где N_0 - отсчет по катетометру нижнего уровня жидкости в трубке;

N_1, N_2, N_3 - отсчет по катетометру верхнего уровня жидкости в трубке;

поэтому $h_1 - h_2 = N_1 - N_2$ и т.д.

С учетом этого получим расчетную формулу

$$\alpha = \frac{D_1 D_2}{4(D_1 - D_2)} (N_1 - N_2) \rho g = \frac{D_1 D_3}{4(D_1 - D_3)} (N_1 - N_3) \rho g = \frac{D_2 D_3}{4(D_2 - D_3)} (N_2 - N_3) \rho g. \quad (3)$$

Методика выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством и правилами работы с катетометром КМ-6 и добиться правильной установки его (см. описание работы М-1)*.

2. Подставку с капиллярами развернуть так, чтобы оси их были горизонтальны. Визирную линию зрительной трубы катетометра с помощью винта 5 (см. рис. I.5) установить так, чтобы она являлась касательной к верхней точке внутреннего диаметра капилляра (рисунок 2). Снять отсчет N'_1 , затем переместить визир в нижнюю точку диаметра и снять второй N'_2 отсчет. Разность снятых отсчетов дает значение D_1 . С помощью рукояток 13 развернуть каретку катетометра, направив ее на второй капилляр, затем на третий и произвести соответствующие измерения.

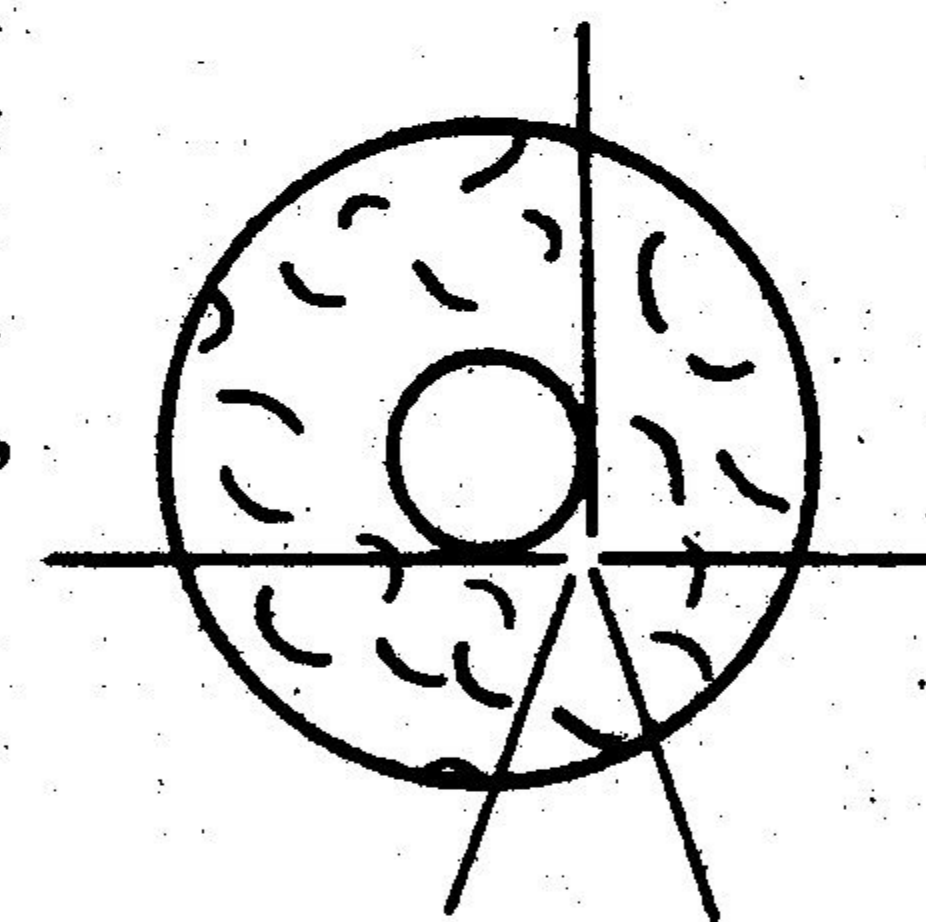


Рис. 2

3. Развернуть подставку таким образом, чтобы оси капилляров заняли строго вертикальное положение. Опустить капилляры в жидкость так, чтобы их нижние торцы погрузились на 5-6 мм ниже поверхности жидкости.

4. Произвести отсчет по катетометру верхних уровней жидкостей в капиллярах.

5. Результаты эксперимента занести в таблицу.

6. Значение ρ взять из таблицы по температуре наблюдения.

7. По выражению (3) определить коэффициент поверхностного натяжения жидкости. Ошибку вычислить по среднему значению.

* Механика: Методические указания к лабораторным работам по курсу физики/Под общ. ред. Н.Г. Грипича. - Николаев: НКИ, 1985.

Номер капилляра	N'	N_1'	N	D	α
1					
2					
3					
					α_0

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. - М.: Физматгиз, 1962, т.1, с.79,80.

Лабораторная работа М-16
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ
И СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА МОЛЕКУЛ ВОЗДУХА
МЕТОДОМ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА ЧЕРЕЗ КАПИЛЛЯР

Ц е л ь р а б о т ы: изучение явления внутреннего трения в газах.

Явление внутреннего трения (вязкость) связано с возникновением сил трения между слоями газа, перемещающимися параллельно друг другу с различными скоростями. Со стороны слоя, движущегося быстрее, на более медленно движущийся слой действует ускоряющая сила. Наоборот, медленно движущийся слой тормозит более быстрый слой газа. Сила трения, которая при этом возникает (формула Ньютона),

$$F = \eta \frac{du}{dz} \Delta S,$$

где η - коэффициент внутреннего трения;

du/dz - градиент скорости, т.е. величина, показывающая, как быстро изменяется скорость движения газа u в направлении z , перпендикулярном к поверхности, разделяющей слой;

ΔS - величина поверхности (рис.1),
сила направлена по касательной к поверхности.

Коэффициент внутреннего трения η численно равен силе трения, действующей на единицу площади, разделяющей слои, при градиенте скорости, равном единице. Измеряется в паскалях в секунду (Па·с).

С точки зрения кинетической теории газов, причиной внутреннего трения является наложение упорядоченного движения слоев газа с различными скоростями u и хаотического теплового движения молекул, средняя скорость которых $\bar{v}$ зависит от температуры и намного больше u . Вследствие теплового движения молекулы непрерывно переходят из одного слоя в другой. Попав в другой слой, молекула претерпевает соударения с молекулами этого слоя, в результате чего она либо отдает избыток своего импульса другим молекулам, либо увеличивает свой импульс за счет других молекул - в зависимости от того, с какого слоя в какой перемещаются молекулы. В итоге импульс более быстрого слоя убывает, а более медленного возрастает. Изменение импульса слоя в единицу времени равно силе трения. Коэффициент трения зависит от средней скорости теплового движения $\bar{v}$, среднего значения длины свободного пробега $\bar{l}$ и плотности ρ газа:

$$\eta = \frac{1}{3} \bar{v} \bar{l} \rho.$$

Из этого соотношения можно определить среднее значение длины свободного пробега газовых молекул

$$\bar{l} = \frac{3\eta}{\rho \bar{v}},$$

где

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}; \quad \rho = \frac{\mu P}{RT};$$

R - универсальная газовая постоянная, равная $8,3 \cdot 10^3$ Дж/(кмоль·К);

μ - молекулярный вес (для воздуха $\mu = 29$ кг/кмоль);

P - давление газа (принять равным атмосферному).

Коэффициент внутреннего трения можно определить по формуле Пуазейля. При ламинарном (слоистом) течении газа в трубе формула Пуазейля имеет вид

$$V = \frac{\pi d^4 t}{128 \eta l} \Delta p,$$

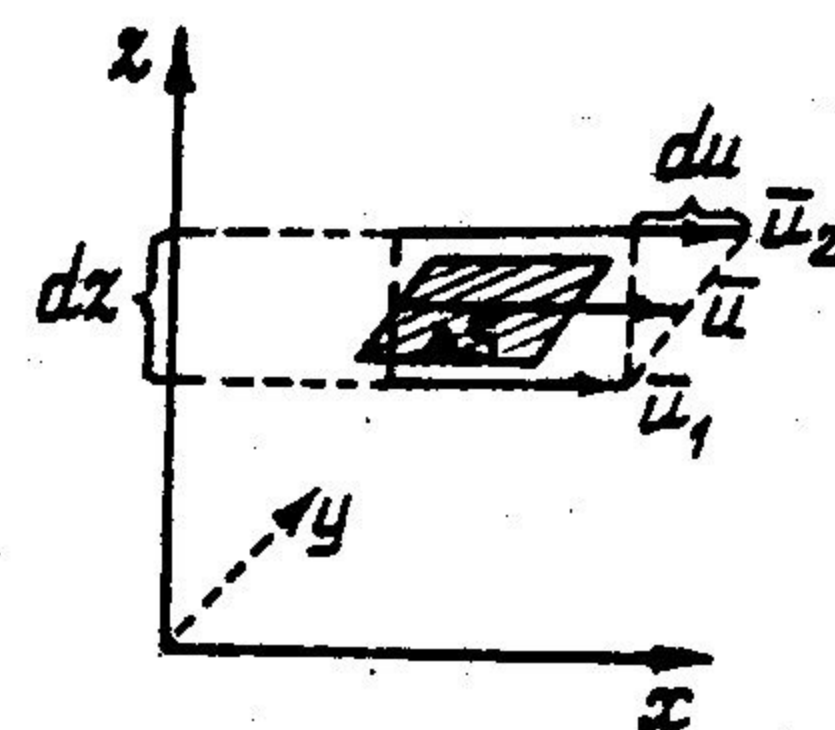
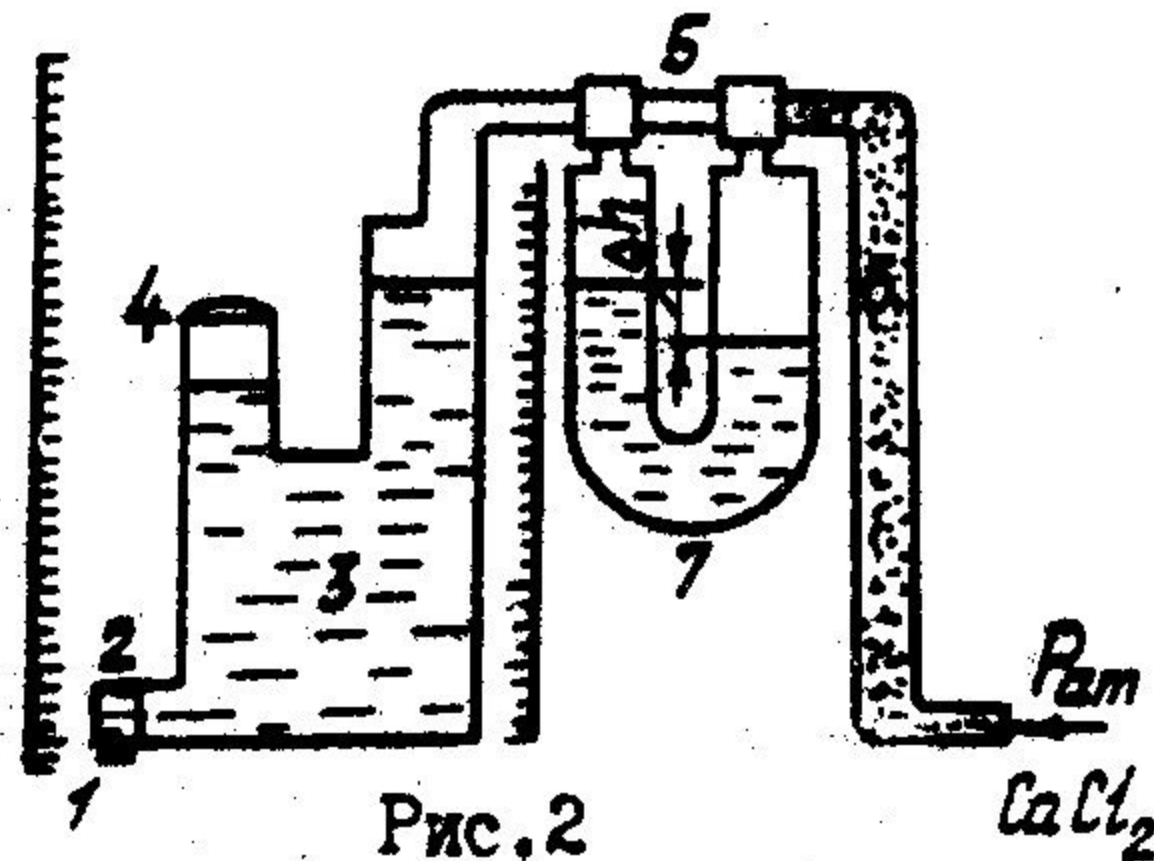


Рис.1

где V - объем газа, вытекающего из трубы за время t ;
 P_1 и P_2 - давление соответственно в начале и в конце участка трубы длиной l ;
 d - диаметр трубы;
 η - коэффициент внутреннего трения.
 Отсюда

$$\eta = \frac{\pi d^4 t}{128 V l} \Delta p.$$

Установка (рис.2) состоит из аспиратора 3, капилляра 5 и сосуда с осушительным фильтром 1. Когда из аспиратора 3 выливается вода через кран 1, давление в нем понижается и воздух будет засасываться через капилляр 5, пройдя осушительный фильтр 1 с хлористым кальцием. Вследствие внутреннего трения давление на концах капилляра неодинаково. Раз-



ность измеряется манометром 7:

$$\Delta p = P_1 - P_2 = \rho_g g \Delta h,$$

где ρ_g - плотность воды в манометре;

Δh - разность уровней воды в манометре.

Длина и диаметр капилляра известны. Объем V воздуха, прошедшего за время t через капилляр, может быть легко определен по шкале 2 аспиратора, градуированной в литрах. Через кран 4 аспиратор заполняют водой. Коэффициент внутреннего трения можно рассчитать по формуле

$$\eta = \frac{\pi d^4 t \rho_g g \Delta h}{128 V l}, \quad (1)$$

а длину свободного пробега -

$$\lambda = \frac{3\eta}{\rho} \sqrt{\frac{\pi R T}{8\mu}}. \quad (2)$$

Методика выполнения работы

Из крана водопровода, пользуясь шлангом, заполнить аспиратор водой. Затем закрыть кран 4 и осторожно открыть кран 1. Следует

выждать 1-1,5 мин, пока установится стационарное течение, при котором разность уровней в манометре изменяться со временем не будет, после чего включить секундомер. После того как вытечет примерно 1 л воды (по шкале 2), выключить секундомер. В процессе опыта измерить разность Δh уровней жидкости в манометре. Опыт провести три-пять раз, определяя при этом Δh , V и t . Измерить атмосферное давление и комнатную температуру. Результаты оформить в виде таблицы:

V	Δh	t	l	d	ρ_g	$\eta = \frac{\pi d^4 t \rho_g g \Delta h}{128 V l}$	p	T	$\bar{\lambda} = \frac{3\eta}{\rho} \sqrt{\frac{\pi R T}{8\mu}}$

Погрешность $\Delta \eta$ найти по методу среднего.

Длину свободного пробега подсчитать один раз, подставив в выражение (2) $\eta_{ср}$. Погрешность $\Delta \bar{\lambda}$ определить дифференцированием логарифма функции.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. - М.: Физматгиз, 1962, т.1, с.299-303.
2. Физический практикум "Механика и молекулярная физика"/Под ред. В.И.Ивероновой. - М.: Физматгиз, 1967, с.237-239.
3. Яворский Б.М. Курс физики. - М.: Высшая школа, 1963, т.1, с.237-246.

Лабораторная работа М-17 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ПО МЕТОДУ СТОКСА

Цель работы: изучение явления вязкости (внутреннего трения) в жидкостях и определение коэффициента внутреннего трения жидкости по методу Стокса.

Основные понятия явления вязкости (внутреннего трения) изложены в работе М-16.

Вязкость газов объясняется переносом количества упорядоченного движения из одного слоя газа в другой. Вязкость жидкостей определяется в основном силами взаимодействия между собой (си-

лами сцепления молекул). Вязкость газов с повышением температуры увеличивается, так как увеличивается скорость хаотического движения молекул газа и, следовательно, перенос количества движения. С повышением температуры вязкость жидкостей, наоборот, уменьшается и при критической температуре становится равной вязкости газа.

В методе Стокса при определении коэффициента внутреннего трения рассматривается движение маленького шарика радиуса R , плотность материала которого ρ_T , в вязкой среде с плотностью ρ_K . На движущийся шарик действуют:

- сила тяжести шарика $P = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_T$;
- сила Архимеда $Q = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_K$;
- сила внутреннего трения жидкости (сила Стокса)
 $F_c = 6\pi \eta R u$.

Формула Стокса получена на основе формулы Ньютона для внутреннего трения.

Когда сила сопротивления Стокса станет равной $P - Q$, движение шарика будет равномерным. Следовательно, в этот момент выполняется равенство

$$6\pi \eta R u = \frac{4}{3} \pi R^3 g (\rho_T - \rho_K),$$

откуда

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{g R^2}{u} (\rho_T - \rho_K). \quad (I)$$

Вблизи поверхности жидкости, стенок и дна сосуда характер движения шарика изменяется, поэтому при выполнении работы следует учитывать лишь те шарики, которые движутся в средней части сосуда.

Формула Стокса справедлива лишь для ламинарного режима движения жидкости, увлекаемой шариком, т.е. при достаточно малых значениях числа Рейнольдса (гораздо меньше единицы). Число Рейнольдса в этом случае

$$Re = \frac{2u R \rho_K}{\eta}.$$

Подставим в формулу (I) значение скорости равномерного движения

$$u = \frac{l}{t},$$

где l - расстояние между визирными нитями;
 t - время падения шарика на этом расстоянии,
и заменим радиус шарика его диаметром d :

$$\eta = \frac{g (\rho_T - \rho_K)}{18t} d^2 t. \quad (2)$$

Методика выполнения работы

Для измерения диаметра шарика применяется микроскоп МИР-12.

1. Поместить шарик на предметное стекло микроскопа, вращая окуляр микроскопа, отфокусировать его измерительные нити. Затем, вращая объектив, отфокусировать край шарика. Вращая барабан микроскопа, навести вертикальную линию на левый край шарика и записать отсчет. Аналогично определить отсчет правого края. Разность отсчетов равна диаметру шарика (по верхней планке микроскопа отсчитываются миллиметры, по барабану - десятые и сотые доли миллиметра). Следует помнить, что если индекс верхней планки стоит против миллиметрового штриха, то число миллиметров следует определять по барабану. Если деления на барабане от 80 до 99, то отсчет по миллиметровой линейке следует брать с недостатком. Если шарик не совсем правильной формы, нужно измерить два взаимно перпендикулярных диаметра и взять из них среднее.

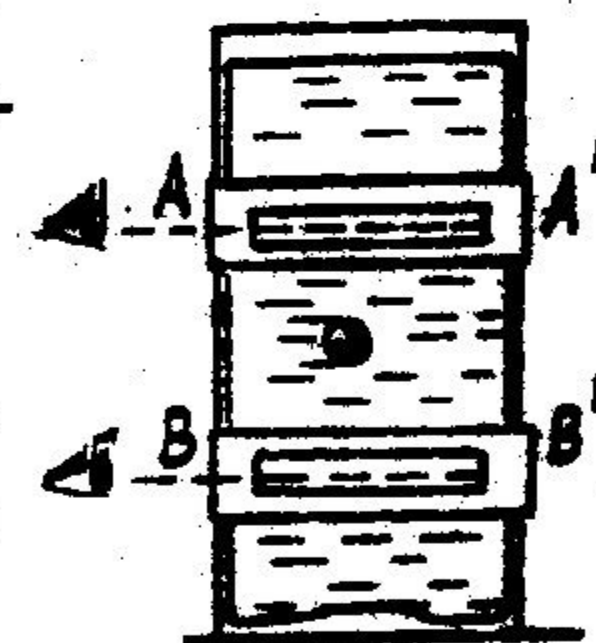
2. При погружении шарика в жидкость к нему часто прилипают пузырьки воздуха. Чтобы не образовался такой пузырек, шарик следует сначала смочить в жидкости, а затем опустить пинцетом под поверхность жидкости. Когда шарик пройдет визирную нить AA' (см. рисунок) верхнего кольца, пустить секундомер, а в момент прохода визирной нити BB' нижнего кольца остановить его.

3. Повторить опыт с 10 шариками.

4. Измерить на противоположных образующих сосуда расстояние между визирными нитями. Найти среднее значение.

5. Плотность шарика взять из таблиц, а плотность жидкости измерить ареометром (денсиметром) несколько раз и принять среднее значение или определить по табл. I Приложения 2 (для глицерина).

6. Значение η вычислить по формуле (2). Погрешность определить методом среднего. Результаты измерений и вычислений свести в таблицу:



$t \text{ } ^\circ\text{C} =$	$f_T =$	$\rho_x =$	$l =$		
Номер опыта	Отметки по шкале микроскопа		Диаметр шарика d	Время прохождения t	η
	Левый край	Правый край			
1					
2					
...					
Среднее					

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. - М.: Наука, 1968, т. I, с. 167-176.
2. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. - М.: Физматгиз, т. I, 196, с. 148-157.

Лабораторная работа М-18 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ КАПИЛЛЯРНЫМ ВИСКОЗИМЕТРОМ ПРИ РАЗНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Цель работы: определение зависимости коэффициента вязкости от температуры.

Основные понятия явления вязкости изложены в работе М-16.

В основу метода определения вязкости с помощью капиллярного вискозиметра положена формула Пуазейля

$$V = \frac{1}{\eta} \frac{\pi R^4 \tau}{8l} (p_1 - p_2),$$

где V - объем жидкости, протекающей через трубу (капилляр) радиуса R при ламинарном течении жидкости за время τ ;

p_1 и p_2 - давление соответственно в начале и в конце участка трубы;

l - длина этого участка;

η - коэффициент динамической вязкости.

Вискозиметр (см. рисунок) представляет собой U-образную

стеклянную трубку. Одно колено трубки содержит расширения 1, 2 и имеет капилляр 3. Другое колено - широкая трубка с резервуаром 4. Сверху и снизу расширения 2 нанесены метки a и b . Объем расширения между этими метками обозначим через V . Так как разность уровней в расширениях 3 и 4 равна h , то разность давления $\Delta p = \rho g h$ и формула Пуазейля имеет вид

$$V = \frac{\pi R^4 h \rho g}{8 \eta l},$$

где ρ - плотность жидкости;

R - радиус капилляра;

l - длина капилляра.

В данной работе используется метод сравнения. Определяется время τ , в течение которого через капилляр протекает объем жидкости известной вязкостью η и известной плотностью ρ , а затем определяется время τ_x , в течение которого жидкость неизвестной вязкостью η_x и известной плотностью ρ_x протекает через капилляр.

В результате

$$V = \frac{\pi R^4 h \rho g}{8 \eta l} \tau \quad \text{и} \quad V = \frac{\pi R^4 \rho_x h g}{8 \eta_x l} \tau_x.$$

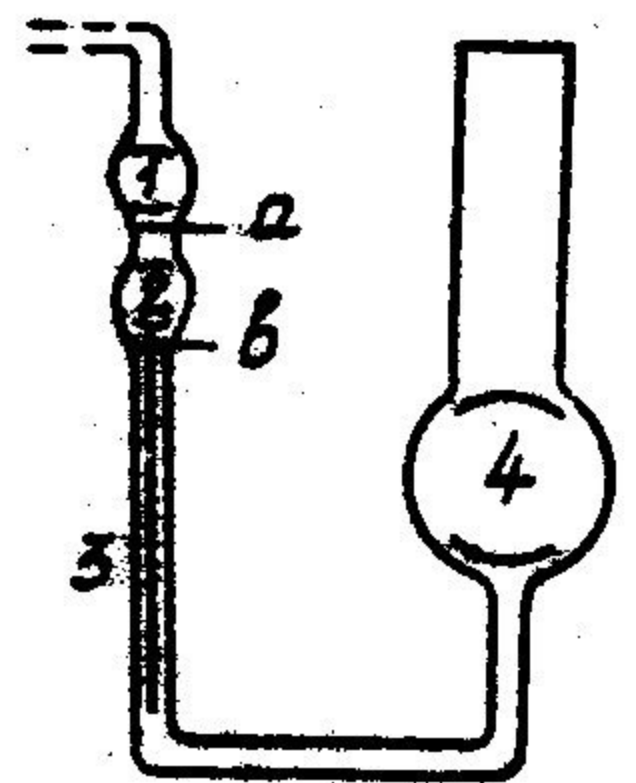
Отсюда можно определить динамическую вязкость неизвестной жидкости

$$\eta_x = \eta \frac{\rho_x \tau_x}{\rho \tau}. \quad (1)$$

Формулу (1) можно использовать для определения коэффициента вязкости при различных температурах. Нужно учесть, что плотность жидкости зависит от температуры по закону

$$\rho_x = \frac{\rho_0}{1 + \alpha (t_x - t_0)}, \quad (2)$$

где ρ_0 - плотность жидкости при комнатной температуре;
 α - температурный коэффициент расширения жидкости;
 t_x - температура жидкости.



Так как α невелико, то формулу (2) можно переписать в таком виде:

$$\rho_x = \rho_0 [1 - \alpha(t_x - t_0)] = \rho_0 - \alpha \rho_0 (t_x - t_0).$$

Плотность некоторых жидкостей не подчиняется линейному закону, а непосредственно ее измерение ареометром не всегда возможно. Для этих случаев целесообразно определять кинематическую вязкость, которая связана с динамической соотношением

$$\eta = \frac{\tau}{\rho}.$$

Кинематическая вязкость может быть рассчитана по формуле

$$\eta_x = \eta \frac{\tau_x}{\tau} \quad (3)$$

Определение температурной зависимости коэффициента динамической вязкости осуществляется по известной зависимости плотности от температуры теплофизических свойств данного вещества

$$\eta_x = \eta \rho_x \quad (4)$$

Методика выполнения работы

Часть I. Определение коэффициента динамической вязкости различных жидкостей при комнатной температуре

I.1. Прибор хорошо прополоскать дистиллированной водой, залив его небольшим количеством жидкости.

I.2. Записать начальную температуру жидкости. Залить в вискозиметр жидкость. Присоединить насос к трубке и создать с их помощью разрежение, засосав им жидкость в утолщение трубки $a\delta$ (когда жидкость поднимется немного выше риски a , прекратить действие насоса). Приготовить к пуску секундомер. При прохождении уровнем жидкости риски a пустить секундомер и остановить его, если уровень жидкости сравняется с риской b . Записать время истечения в таблицу.

I.3. Прodelать три опыта с дистиллированной водой и исследуемыми жидкостями. Время истечения для каждого опыта записать в таблицы и усреднить.

I.4. Вычислить по формуле (1) коэффициент вязкости исследуемой жидкости. Если плотность жидкости неизвестна, определить ее с помощью ареометра. Все измерения занести в таблицу типа табл. I. Ошибку определить по среднему.

$t =$ $\rho =$

Номер опыта	Жидкость 1 (вода)		Жидкость 2		Жидкость 3	
	$\rho =$	$\Delta \rho =$	$\rho =$	$\Delta \rho =$	$\rho =$	$\Delta \rho =$
	$\tau =$	$\Delta \tau =$	$\tau =$	$\Delta \tau =$	$\tau =$	$\Delta \tau =$
1						
2						
...						
Среднее	$\bar{\rho} =$	$\Delta \bar{\rho} =$	$\bar{\rho} =$	$\Delta \bar{\rho} =$	$\bar{\rho} =$	$\Delta \bar{\rho} =$

Часть 2. Определение температурной зависимости коэффициента динамической вязкости

2.1. Залить прибор дистиллированной водой, определить ее температуру и измерить время истечения жидкости в соответствии с п. I.2.

2.2. Залить в прибор исследуемую жидкость, с помощью термостата добиться установившейся температуры и провести замер времени истечения жидкости в соответствии с п. I.2.

2.3. Измерить время истечения жидкости не менее чем 6-10 раз при различной температуре. Все измерения занести в таблицу типа табл. 2.

Таблица 2

Номер опыта	Температура опыта $t, ^\circ\text{C}$	Время истечения $\tau, \text{с}$	Плотность жидкости $\rho, \text{кг/м}^3$	Вязкость жидкости η , $\text{Н}\cdot\text{с/м}^2 (\text{Па}\cdot\text{с})$
1				
2				
...				

Часть 3. Измерение температуры эталонной жидкости и определение времени ее истечения в вискозиметре в соответствии с п. I.2

3.1. Поместить вискозиметр в термостат, залить исследуемой жидкостью, термостатировать ее и провести измерения времени истечения для десяти значений температуры.

3.2. Определить температурную зависимость коэффициента кинематической вязкости по формуле (3), затем зависимость плотности

от температуры по таблицам теплофизических величин, вычислить температурную зависимость коэффициента динамической вязкости (4) и построить график. Погрешность определить методом дифференцирования.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Зисман Т.А., Тодес О.М. Курс физики. - М.: Наука, 1968, т. I, с. 240-244.
2. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. - М.: Физматгиз, 1962, т. I, с. 148-157.

Лабораторная работа М-19 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель работы: изучение температурной зависимости коэффициента вязкости жидкости вискозиметром Гэпплера.

В жидкостях перенос импульса между слоями, движущимися с различными скоростями, описывается формально теми же уравнениями, что и в газах. Однако механизм внутреннего трения жидкостей отличается от простой диффузии. Молекулы жидкости большую часть времени находятся около положений равновесия, поэтому при движении слоя жидкости движущаяся масса увлекает соседние слои в основном за счет сил сцепления. С ростом температуры вязкость жидкостей уменьшается, так как при этом уменьшаются силы сцепления. Вязкость определяет силу сопротивления жидкости движению тел в ней. Существуют различные методы определения коэффициента вязкости жидкостей (см. работы М-17 и М-18).

В данной работе используется вискозиметр Гэпплера (аналогично методу Стокса). Коэффициент вязкости жидкости численно равен силе трения между движущимися слоями, действующей на единицу площади при градиенте скорости, равном единице.

В данной работе коэффициент вязкости вычисляется по формуле

$$\eta = k(\rho_1 - \rho_2)\tau,$$

где k - постоянная шарика, $\text{м}^2/\text{с}^2$;

τ - время падения шарика, с;

ρ_1 - плотность шарика, $\text{кг}/\text{м}^3$;

ρ_2 - плотность жидкости при температуре измерения, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Плотность используемого стеклянного шарика $\rho_1 = 2400 \text{ кг}/\text{м}^3$, диаметр его 15,630 мм, постоянная этого шарика $0,07 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}^2$. Вследствие низкого коэффициента расширения стекла можно пренебречь изменением его плотности с повышением температуры. Плотность жидкости (дистиллированной воды) нужно определить с точностью до третьего разряда при помощи табл. I.

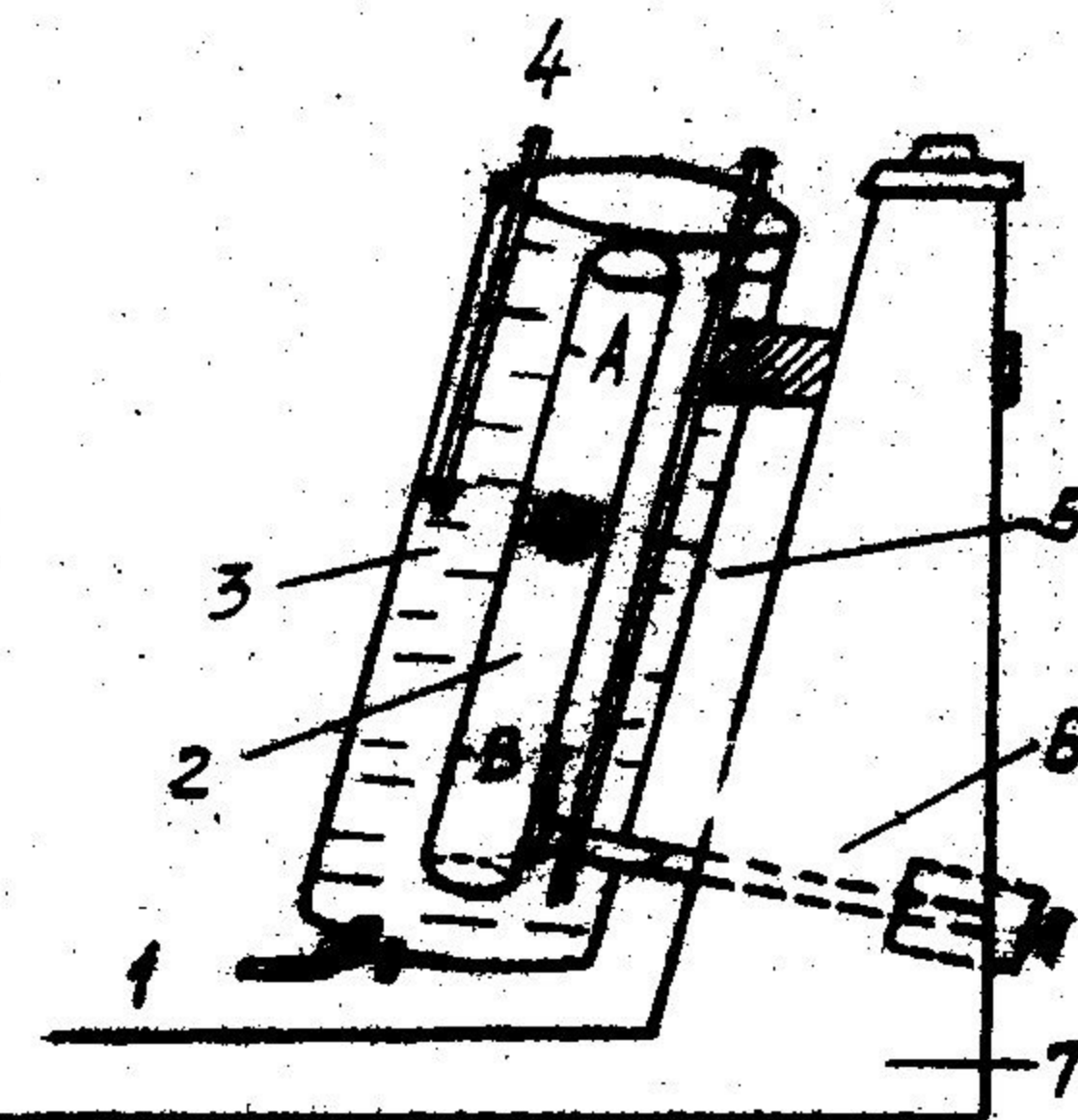
Таблица I

Температура, °C	0	4	8	10	14	16	18
0	999,87	1000,00	999,88	999,73	999,27	998,97	998,52
20	998,15	997,80	996,27	995,68	994,40	993,72	993,00
40	992,25	990,70	989,00	988,10	986,20	985,30	984,30
60	983,20	981,10	978,90	977,80	975,50	974,30	973,10

Вычисляем вязкость жидкости при различной температуре и строим график. С повышением температуры вязкость жидкости уменьшается. Единица измерения вязкости в СИ - $\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ (Па · с).

Описание прибора

Вискозиметр Гэпплера состоит из двух основных частей (см. рисунок): стойки 7 и самого вискозиметра 5, наклоненного на 10 град по отношению к вертикали. Опускная труба 2 находится в водяной бане 3. В опускной трубе падает шарик. Время падения его измеряется метками А и В. Вискозиметр может поворачиваться в положения измерения или возвратного движения шарика, для этого его нужно освободить от фиксированного состояния, вытягивая палец 6. Опускная труба заполнена дистиллированной водой, концы ее закрыты загорными пробками. В нижней части ба-



ни находятся два патрубка I для подвода и спуска воды. В баню опущен термометр 4. Вискозиметр снабжен нагревателем, который через пристроенный штепсель присоединяется к шнуру, а тем самым к электрической сети. Автоматический насос присоединяют к короткому патрубку I, он служит мешалкой для воды. Регулирование температуры осуществляется периодическим включением и выключением прибора, причем следует одновременно приводить в действие пневмомешалку.

Методика выполнения работы

1. Заполнить баню водой через отверстие для термометра или через патрубок I, для чего перевернуть вискозиметр вверх дном. Водяная баня не должна быть заполнена доверху.
2. Присоединить пневмомешалку, не забывая ослаблять пробку в рабочем положении вискозиметра для выпуска воздуха.
3. Включить нагреватель и наблюдать за показанием термометра. Температуру поддерживать постоянной с точностью до $0,5^{\circ}\text{C}$, включая и выключая обогрев. Примерно 5-10 мин достаточно для полного выравнивания температуры в опускной трубе.
4. Установить вискозиметр перед белым экраном и вернуть шарик в рабочее положение.
5. Секундомером измерить время падения шарика между метками.
6. Повысить температуру на $4-10^{\circ}\text{C}$ и снова провести измерение. Число измерений задается преподавателем.
7. По приведенной на с.40 формуле подсчитать коэффициент вязкости дистиллированной воды при пяти-шести значениях температуры и построить график зависимости η от t .

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. С а в е л ь е в И.В. Курс общей физики. - М.: Физматгиз, 1977, т. I.
2. Ф р и ш С.Э., Т и м о р е в а А.В. Курс общей физики. - М.: Физматгиз, 1962, т. I.

П Р И Л О Ж Е Н И Е I

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

М-8

1. Каким методом определяется удельная теплота парообразования воды λ в работе?
2. Как меняется удельная теплота парообразования с повышением температуры?
3. Как изменяется температура кипения жидкости, если ее превращение в пар происходит при постоянном давлении?
4. Последовательность операций при проведении опыта.
5. Составить уравнение теплового баланса для данной работы.
6. В каких единицах измеряется удельная теплота парообразования?
7. Какой закон используется при составлении основного расчетного соотношения (рабочей формулы)?
8. Какие процессы, протекающие в калориметре, сопровождаются выделением теплоты?
9. Каким методом целесообразно воспользоваться для расчета погрешности определения λ ?

М-9

1. Дать определение идеального газа.
2. Как записать уравнение Менделеева - Клапейрона?
3. Чему равна энергия молекул идеального газа?
4. Какие параметры моделируют в данной установке давление и температуру газа?
5. Математическая формулировка законов Бойля - Мариотта, Гей-Люссака и Шарля и их графическое изображение в $p-V$, $p-T$, $V-T$ координатах.

М-10

1. От чего зависит теплоемкость газов?
2. Какой процесс называется адиабатическим?
3. Какие процессы используются при определении γ по методу Клемана и Дезорма?
4. Какая формула называется рабочей для определения γ ?
5. Как оценивается погрешность измерения γ ?

М-II

1. Каким прибором измеряется температура в данной работе?
2. Какие параметры фиксирует электронный самопишущий потенциометр на диаграммной ленте?
3. Какой вид имеет график охлаждения образца?
4. Как определяется скорость охлаждения при определенной (средней) температуре?
5. Что необходимо знать для определения теплоемкости данного металла при данной температуре?
6. Формула Ньютона для расчета количества теплоты.
7. Как можно определить скорость охлаждения при данной температуре?
8. От чего зависит удельная теплоемкость образца?
9. По какой формуле рассчитывается теплоемкость испытуемого образца?
10. Скорость охлаждения какого образца больше, если их массы равны?

М-I2

1. В чем заключается процесс испарения?
2. Что называется скоростью испарения?
3. Формула скорости испарения.
4. Что такое энтропия?
5. Чему равно изменение энтропии?
6. Что называется удельной теплотой испарения?
7. Формула для изменения энтропии жидкости.
8. Какими весами пользуются во время эксперимента?
9. Каким методом подсчитываются погрешности определяемых величин?

М-I3

1. Что называется коэффициентом поверхностного натяжения?
2. Каково усилие отрыва капли?
3. Зависит ли коэффициент поверхностного натяжения от концентрации примесей?
4. Что называется коэффициентом поверхностного натяжения (энергетическое определение)?
5. В какую сторону в общем случае направлена сила избыточного давления под искривленной поверхностью жидкости?

6. Чем обусловлено поверхностное натяжение в жидкостях?
7. В каких единицах измеряется коэффициент поверхностного натяжения?
8. Каким образом определяется коэффициент поверхностного натяжения в данной работе?
9. Каким образом представляется окончательный результат по данной работе?

М-I4

1. Чем обусловлено поверхностное натяжение в жидкостях?
2. Энергетическое определение коэффициента поверхностного натяжения.
3. Силковое определение коэффициента поверхностного натяжения.
4. Каков вид рабочей формулы?
5. Последовательность операций при проведении эксперимента.
6. В какую сторону в общем случае направлена сила избыточного давления под искривленной поверхностью жидкости?
7. Условие отрыва пластинки от поверхности жидкости.
8. Формула силы поверхностного натяжения, действующей по периметру отрывающей пластинки.
9. Каким методом определяется погрешность α_k ?

М-I5

1. Чем обусловлено поверхностное натяжение в жидкостях?
2. Силковое определение коэффициента поверхностного натяжения.
3. Энергетическое определение коэффициента поверхностного натяжения.
4. Как пользоваться катетометром, каково назначение его микрометрических винтов и как снимать отсчет по его шкале?
5. По какой расчетной формуле в данной работе определяется коэффициент поверхностного натяжения?
6. От каких величин явно не зависит высота поднятия жидкости в капиллярах?
7. В какую сторону в общем случае направлена сила избыточного давления под искривленной поверхностью жидкости?
8. Погрешность измерения какой из опытных величин оказывает наибольшее влияние на точность результата?
9. Результаты каких измерений по катетометру необходимо использовать для расчета радиуса мениска?

М-16

1. Перенос какой величины обуславливает явление внутреннего трения (вязкости)?
2. Что называется коэффициентом вязкости?
3. В каких единицах измеряется коэффициент вязкости?
4. Что такое вязкость?
5. Как определяется средняя длина свободного пробега молекул λ ?
6. Формула Ньютона для вязкости.
7. Как распределяются скорости движущихся слоев по поперечному сечению канала трубки?
8. Формула для расчета коэффициента вязкости.
9. Каким методом рассчитываются погрешности определяемых величин?

М-17

1. В каких единицах измеряется коэффициент вязкости?
2. Как изменится скорость движения шариков с увеличением их диаметра?
3. Что называется коэффициентом вязкости?
4. Что такое вязкость?
5. В каком случае начиная с некоторого момента времени шарик движется равномерно?
6. Формула для расчета коэффициента вязкости.
7. Какие силы действуют на шарик, движущийся в жидкости?
8. Что называется градиентом скорости?

М-18

1. В каких единицах измеряется коэффициент вязкости?
2. Как распределяются скорости движущихся слоев по поперечному сечению канала трубки?
3. Формула Пуазейля.
4. Устройство вискозиметра и правила пользования им.
5. Что такое вязкость?
6. Что называют коэффициентом вязкости?
7. Зачем одно из колен вискозиметра делают в виде капилляра?
8. Формула для расчета коэффициента вязкости.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2 Таблица 1

$t, ^\circ\text{C}$	Вода				Спирт	Глицерин
	Плотность $\rho \cdot 10^3, \text{кг/м}^3$	Теплоем- кость $c \cdot 10^{-3}, \text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$	Коэффици- ент поверх- ностного натяжения $\alpha \cdot 10^{-2}, \text{Н/м}$	Коэффици- ент зну- треннего трения $\eta \cdot 10^{-3}, \text{Н}\cdot\text{с/м}^2$	Теплота испарения $r \cdot 10^{-5}, \text{Дж/кг}$	Плотность $\rho \cdot 10^{-3}, \text{кг/м}^3$
0	1,0000	4,224	7,549	1,797	9,249	1,267
5	1,0000	4,209	7,457	1,518	9,256	1,266
10	0,9997	4,197	7,401	1,307	9,263	1,264
15	0,9991	4,191	7,326	1,140	9,257	1,262
20	0,9982	4,186	7,253	1,004	9,250	1,259
25	0,9971	4,183	7,178	0,895	9,241	1,257
30	0,9935	4,179	7,103	0,803	9,230	1,255
35	0,9935	4,179	7,029	0,723	9,216	1,255

Таблица 2

$t, ^\circ\text{C}$	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
$c, \text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$	381	388	394	402	408	414	421	427	434	442	448	454	462	469

Таблица 3

$p \cdot 10^5, \text{Па}$	0,99	1,00	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06
$t, ^\circ\text{C}$	99,41	99,67	99,89	100,18	100,48	100,73	100,94	101,27

1 мм рт.ст. = 133,3 Па.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа М-8. Определение удельной теплоты парообразования (конденсации) воды при температуре кипения	3
Лабораторная работа М-9. Проверка законов идеального газа	6
Лабораторная работа М-10. Определение отношения теплоемкостей для воздуха	9
Лабораторная работа М-11. Определение удельной теплоемкости металла методом охлаждения	13
Лабораторная работа М-12. Определение скорости испарения жидкости и изменения ее энтропии	18
Лабораторная работа М-13. Определение зависимости коэффициента поверхностного натяжения от концентрации раствора	21
Лабораторная работа М-14. Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкостей с помощью торсионных весов	24
Лабораторная работа М-15. Определение коэффициента поверхностного натяжения методом поднятия жидкости в капиллярах	27
Лабораторная работа М-16. Определение коэффициента внутреннего трения и средней длины свободного пробега молекул воздуха методом течения газа через капилляр	30
Лабораторная работа М-17. Определение коэффициента вязкости по методу Стокса	33
Лабораторная работа М-18. Определение коэффициента вязкости жидкости капиллярным вискозиметром при разных температурах	36
Лабораторная работа М-19. Определение зависимости вязкости жидкости вискозиметром Гэшлиера	40
Приложение 1	43
Приложение 2	47

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Методические указания к лабораторным работам
по курсу физики

Под общ. ред. Н. Г. Грипица

Ст. редактор В. Н. Крохина
Технический редактор Н. А. Шайкина

Формат 70x108¹/16. Бумага для множительных аппаратов.
Плоская печать. 2,75 усл. печ. л. 2,75 уч.-изд. л. Тираж 1500 экз.
Изд. № 36. Зак. № 39. Цена 20 коп.

Типография ЭПМ НКМ. Г. Николаев, ул. Скорыходова, 5.