

53
Ф50
93
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКИЙ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ

Руководство
к лабораторным занятиям
по физике

Часть II

МОСКВА 1968

53
9250
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

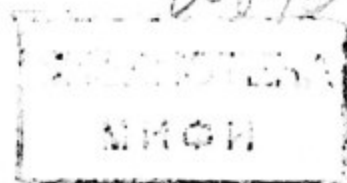
МОСКОВСКИЙ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ

Руководство
к лабораторным занятиям
по физике

Часть II

Под редакцией *Е. Л. Устюжаниной*



МОСКВА 1968

ПРЕДИСЛОВИЕ

Вторая часть «Физического практикума» содержит описания лабораторных работ, выполняемых студентами во втором семестре.

В соответствии с содержанием курса практикум охватывает два основных раздела:

1. Колебания и волны.
2. Молекулярная физика и термодинамика.

Работы 6 и 14 носят комплексный характер и могут быть отнесены к тому и к другому разделу.

Вторая часть физического практикума представляет собой следующий шаг на пути овладения техникой физического эксперимента.

На выполнение каждой работы отводится три академических часа занятий. Подготовка к выполнению лабораторных работ производится студентами в часы их самостоятельной работы. Обработка результатов измерений и составление заключения о выполненной работе в случае необходимости также переносятся на время самостоятельных занятий. Таким образом, часы, которые согласно расписанию отводятся на занятия в лаборатории, используются в основном для непосредственной экспериментальной работы на установках.

Сборник подготовлен коллективом преподавателей и сотрудников кафедры общей физики МИФИ. В его составлении принимали участие: Г. Г. Аксенова, К. Т. Басова, Н. Н. Взоров, Н. И. Гольдфарб, Н. С. Егорова, О. И. Замша, И. Е. Иродов, С. А. Коган, Ю. П. Козырев, В. Н. Лихачев, В. С. Моспанов, В. И. Майкова, Г. И. Пантюхов, Ю. И. Плотников, И. С. Ромченко, И. В. Савельев, Н. Б. Сперанская, Л. В. Сулима, Е. Л. Устюжанина, А. В. Шмыкова.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Работа в лаборатории требует от студента тщательной подготовки, поэтому кроме описания работы необходимо использовать следующие учебные пособия:

1. И. В. Савельев «Курс общей физики». Т. 1, М., «Наука», 1966.

2. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Под ред. Л. Л. Гольдина. М., «Наука», 1964.

3. Физический практикум. Под ред. В. И. Ивероной. М., Физматгиз, 1962.

При подготовке к лабораторной работе студент обязан вписать в лабораторный журнал:

- 1) название работы и ее номер;
- 2) принципиальную и рабочую схемы установки;
- 3) таблицы, расчетные формулы и формулы расчета погрешностей.

К работе в лаборатории допускаются только подготовленные студенты. При выполнении работы необходимо учитывать, что большинство установок и приборов выполнено из стекла, кроме того, в некоторых работах используются приборы с ртутью и дьюаровы сосуды с жидким азотом. Это заставляет предъявлять серьезные требования к дисциплине студентов в процессе выполнения работы. Студент должен быть сосредоточен, внимателен и осторожен при работе с установками или с отдельными их деталями. Он должен руководствоваться правилами техники безопасности и мерами предосторожности, указанными в описаниях.

Выполнение работы требует от студента отчетливого представления тех действий, которые необходимо произвести при работе с установками и в том порядке, какой рекомендуется в описаниях.

В процессе измерений следует систематически и аккуратно производить запись результатов в лабораторный журнал. Отсчеты, как правило, заносятся в таблицы, форма которых должна быть продумана и подготовлена. Все факторы, способные оказать влияние на точность измерений, должны быть записаны. Необходимо в тех случаях, когда это рекомендуется, графические построения проводить в процессе самой работы. Графики должны быть выполнены на миллиметровой бумаге и вклеены в журнал.

Выполнение работы заканчивается составлением краткого заключения, в котором следует указать:

- 1) что и каким методом исследовалось или определялось;
- 2) какой результат и с какими погрешностями (абсолютными и относительными) был получен;
- 3) краткое обсуждение полученных результатов и анализ погрешностей.

ПРАВИЛА ПОСТРОЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ГРАФИКОВ

В экспериментальной физике результаты измерений важно представить в наглядной форме, удобной для использования и обработки. Обычно для этого составляют таблицы, графики и уравнения. Представление данных в виде таблиц облегчает сравнение различных значений, поэтому данные опыта, как правило, записываются в таблицу, которая позволяет также вести и обработку результатов измерений. Для того чтобы найти связь между переменными, строят графики. При этом функциональная зависимость становится явной, а результаты опыта наглядными. График представляет зависимость, как правило, между двумя переменными. При его построении необходимо пользоваться определенными правилами.

График выполняется на миллиметровой (или специальной) бумаге, на которую наносятся координатные оси; для независимой переменной всегда используется ось абсцисс. На оси наносится масштаб, неудачный выбор которого — одна из наиболее распространенных ошибок, зачастую обесценивающих график. Масштаб наносят так, чтобы расстояние между делениями составляло 1, 2, 5 единиц (допустимы 2, 5 и 4) или эти же цифры, умноженные на $10^{\pm n}$ (n — целое число). Число делений с цифрами на каждой оси составляет обычно от 4 до 10. В конце оси указывается откладываемая величина и ее размерность. Обычно туда же выносятся и порядок масштаба ($10^{\pm n}$). Масштаб нужно выбирать так, чтобы кривая заняла весь лист, а погрешность измерения соответствовала одному-двум мелким делениям графика. При этом начало отсчета не обязательно начинать с нуля, иногда удобнее выбрать округленное число и таким образом увеличить масштаб, но погрешность при этом должна составлять по-прежнему одно-два мелких деления. Для

обработки результатов удобно, чтобы кривая была близка к прямой, наклоненной под углом 45° к оси абсцисс. Для этого на графике откладывается не сама величина, а ее функция (логарифм, обратная величина и т. д.) так, чтобы полученный график был линейным.

Точки на график нужно наносить точно и тщательно, обводя их кружком или каким-нибудь другим знаком

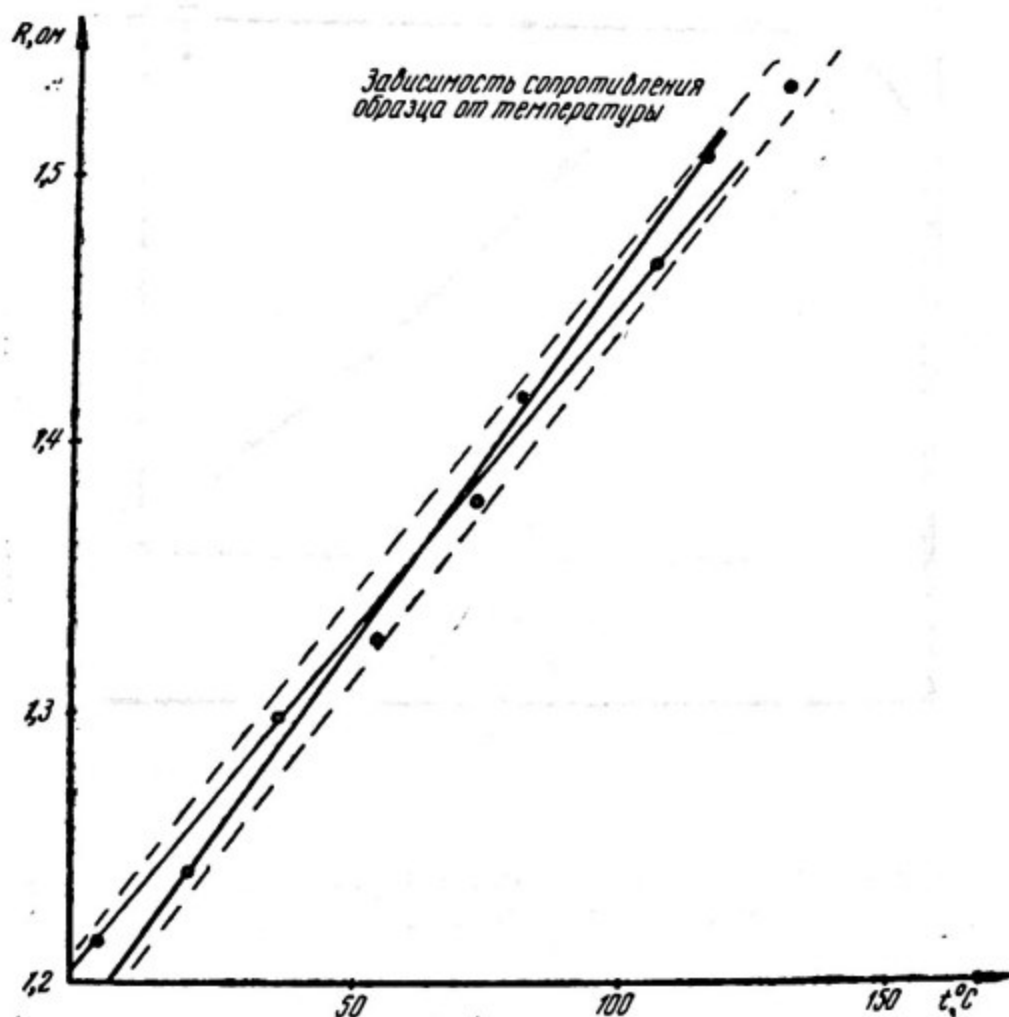


Рис. 1.

(рис. 1). Если можно определить доверительный интервал для данного измерения или приборную ошибку, то этот интервал в масштабе откладывается по обе стороны от точки (рис. 2) так, чтобы точка оказалась в центре креста, образованного доверительными интервалами.

Затем наносится наиболее подходящая плавная кривая с малым числом перегибов, проходящая через доверительные интервалы как можно ближе к нанесенным точкам. На каж-

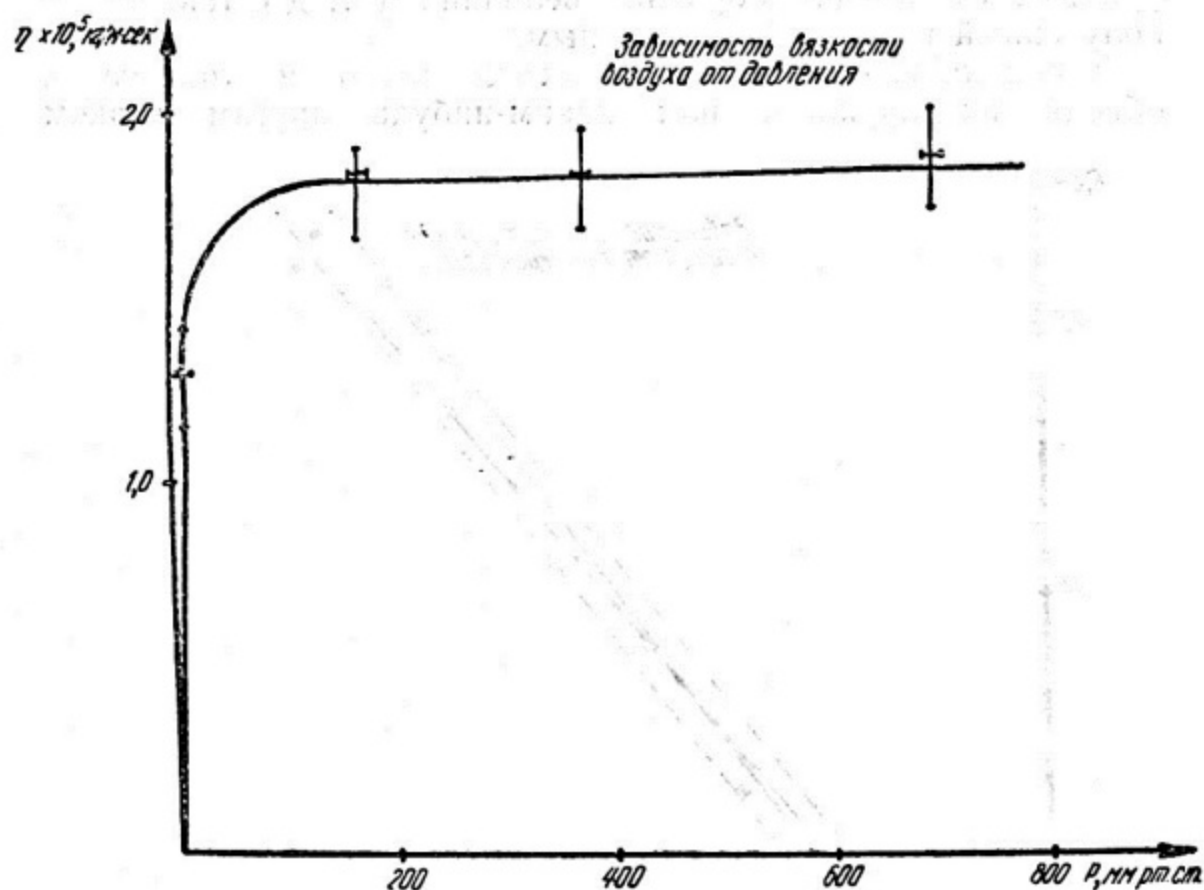


Рис. 2.

дом участке графика точки должны располагаться примерно поровну по обеим сторонам кривой.

Исключение составляет градуировочный график (рис. 3), на котором точки соединяются последовательно прямыми линиями, так как при этом мы считаем значения величин точными, а кривая служит для отыскания промежуточных значений линейной интерполяцией.

Окончив построение графика, пишут заголовок (обычно в правом верхнем углу), который должен содержать точное и краткое описание того, что показывает график.

Обработка результатов сводится к выяснению аналитической зависимости между величинами. Если эта зависимость нелинейная, то обработка сложна. Остановимся на

случае, когда уравнение имеет вид прямой линии: $y = kx + b$. При этом угловой коэффициент k находится как отношение приращения функции к приращению аргумента, взятое по

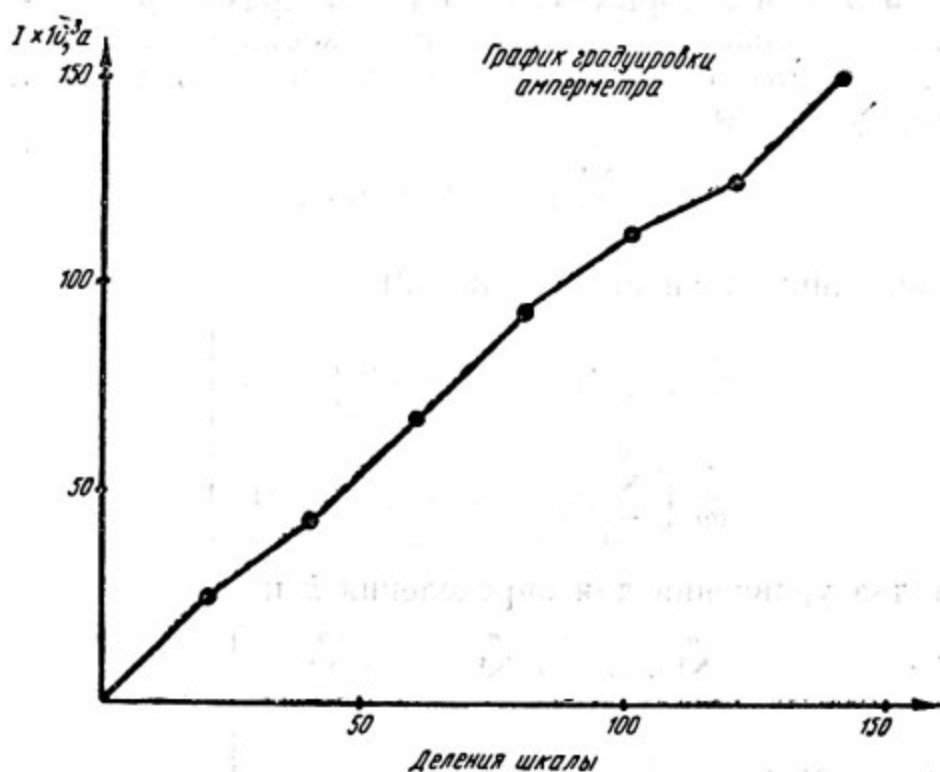


Рис. 3.

выбранной прямой на возможно большем интервале изменения аргумента:

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x}. \quad (1)$$

Определим ошибку в k . Если известны доверительные интервалы, то через их концы проводятся две вспомогательные прямые, параллельные ранее начерченной. Крайние точки параллельных прямых соединяются крест-накрест и находятся угловые коэффициенты этих прямых k_1 и k_2 . Тогда ошибка в k примерно равна:

$$\Delta k = \frac{|k_2 - k_1|}{2}.$$

Аналогично определяется ошибка и в том случае, когда доверительные интервалы неизвестны. Вспомогательные прямые при этом проводятся через наиболее удаленные от основной прямой точки (см. рис. 1).

Более точно можно вычислить угловой коэффициент k и свободный член, если воспользоваться методом наименьших квадратов, который заключается в нахождении таких значений k и b , при которых расстояния от прямой $y = kx + b$ до экспериментальных точек с координатами x_i и y_i ($i = 1, 2, \dots, n$) были бы наименьшими. Это эквивалентно минимуму суммы

$$\sum_{i=1}^n (y_i - kx_i - b)^2. \quad (2)$$

Условия минимальности суммы (2)

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial k} \left[\sum_{i=1}^n (y_i - kx_i - b)^2 \right] &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial b} \left[\sum_{i=1}^n (y_i - kx_i - b)^2 \right] &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

дают два уравнения для определения k и b :

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n x_i y_i &= k \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i, \\ \sum_{i=1}^n y_i &= k \sum_{i=1}^n x_i + nb. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Если ввести обозначения средних значений x и y :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i,$$

то систему уравнений (4) можно записать в виде

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}; \quad (5)$$

$$b = \bar{y} - k\bar{x}. \quad (6)$$

Этот метод позволяет найти и ошибку в определении k и b . Однако способ определения ошибок весьма сложен, поэтому приводятся только результаты расчетов.

Средняя квадратичная ошибка углового коэффициента k равна

$$S'_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - kx_i - b)^2}{(n-2) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}. \quad (7)$$

Средняя квадратичная ошибка свободного члена b равна

$$S'_b = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - kx_i - b)^2 \sum_{i=1}^n x_i^2}{(n-2) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}. \quad (8)$$

или

$$S'_b = S'_k \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}. \quad (9)$$

В качестве примера рассмотрим вычисление температурного коэффициента сопротивления металла по методу наименьших квадратов. Сопротивление зависит от температуры по линейному закону:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) = R_0 + R_0 \alpha t;$$

свободный член определяет сопротивление R_0 при температуре 0°C , а угловой коэффициент — произведение температурного коэффициента α на сопротивление R_0 .

Результаты расчета приведены в таблице (см. стр. 12), из которой нетрудно найти:

$$\alpha R_0 = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})(R_i - \bar{R})}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} = \frac{192,3}{78\,424} = 0,00245 \text{ ом/град}$$

и $R_0 = 1,575 - 0,00245 \cdot 157,0 = 1,190 \text{ ом}$; отсюда $\alpha = \frac{0,00245}{1,190} = 0,00206 \text{ град}^{-1}$.

Расчет температурного коэффициента сопротивления по методу наименьших квадратов

Номер измерения	$t, ^\circ\text{C}$	$R, \text{ом}$	$t - \bar{t}$	$R - \bar{R}$	$(t - \bar{t})(R - \bar{R})$	$(t - \bar{t})^2$	$R_0 \alpha t$	$\frac{ R_t - R_0 }{-R_0 \alpha t}$	$\frac{ R_t - R_0 }{-R_0 \alpha t} \cdot 10^4$
1	23	1,242	-134	-0,359	+48,2	17 956	0,056	0,004	0,16
2	59	1,326	-98	-0,249	+14,4	9 604	0,145	0,009	0,81
3	84	1,386	-73	-0,189	+13,8	5 329	0,201	0,005	0,25
4	96	1,417	-61	-0,158	+9,4	3 721	0,230	0,003	0,09
5	120	1,512	-3,7	-0,062	+2,3	1 369	0,294	0,028	7,84
6	133	1,520	-4	+0,015	-0,1	16	0,376	0,024	5,76
7	186	1,664	+29	+0,089	+2,5	841	0,456	0,018	3,24
8	212	1,712	+55	+0,137	+7,5	3 025	0,521	0,001	0,01
9	244	1,784	+87	-0,209	+18,2	7 569	0,602	0,008	0,64
10	270	1,823	+133	+0,248	+28,0	12 770	0,662	0,029	8,41
11	289	1,854	+132	+0,289	+38,1	17 420	0,710	0,036	12,96
Σ	1732	17,330	0	0	192,3	78 424	—	—	40,17
$\frac{1}{n} \Sigma$	157,0	1,575	0	0	—	—	—	—	—

Важно вычислить ошибку в определении α . Так как

$$\alpha = \frac{\alpha R_0}{R_0},$$

то

$$S'_\alpha = \alpha \sqrt{\left(\frac{S_{\alpha R_0}}{\alpha R_0}\right)^2 + \left(\frac{S'_{R_0}}{R_0}\right)^2}.$$

Пользуясь таблицей, находим

$$S_{\alpha R_0} = \sqrt{\frac{40,17 \cdot 10^{-4}}{9 \cdot 78 \cdot 400}} \approx 0,76 \cdot 10^{-4},$$

$$S'_{R_0} = 0,76 \cdot 10^{-4} \sqrt{343 \cdot 800} = 0,046,$$

$$S'_\alpha = 0,94 \cdot 10^{-4}.$$

По этим данным нетрудно определить доверительные интервалы для исследуемых величин, умножая найденные среднеквадратичные ошибки на коэффициенты Стьюдента.

Работа 1

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА К ИССЛЕДОВАНИЮ КОЛЕБАНИЙ ЗВУКОВОЙ ЧАСТОТЫ

ВВЕДЕНИЕ

Электронный осциллограф — электроизмерительный прибор, предназначенный для наблюдения и исследования электрических процессов. С помощью осциллографа можно исследовать форму кривых, описывающих процесс, сравнивать амплитуду и частоту различных переменных напряжений и т. д. Применяя специальные преобразователи, с помощью осциллографа можно также исследовать быстрые неэлектрические процессы, например механические колебания.

Цель данной работы рассмотреть применение электронного осциллографа к исследованию электрических колебаний звуковой частоты. В работе изучаются процессы сложения колебаний одного направления и сложения взаимно перпендикулярных колебаний. В качестве источника колебаний применяется стандартный звуковой генератор (ЗГ), с помощью которого можно получить колебания в широком диапазоне частот, и генератор Γ_x , частота которого постоянна.

При сложении колебаний одного направления с одинаковой амплитудой a и близкими частотами ω и $\omega + \Delta\omega$ ($\Delta\omega \ll \omega$) возникает сложное колебание, называемое биеениями.

Запишем уравнения колебаний:

$$x_1 = a \cos \omega t,$$

$$x_2 = a \cos (\omega + \Delta\omega) t.$$

Сложив эти выражения, получим

$$x = x_1 + x_2 = \left(2a \cos \frac{\Delta\omega}{2} t \right) \cos \omega t \quad (1.1)$$

(во втором множителе пренебрегаем членом $\frac{\Delta\omega}{2}$, который значительно меньше ω). Движение, описываемое формулой (1.1), можно рассматривать как гармоническое колеба-

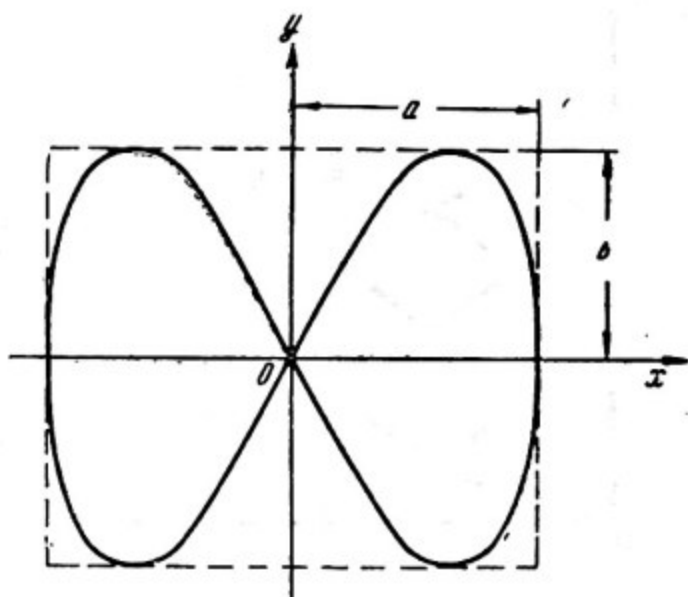


Рис. 1.1.

ние частоты ω с переменной амплитудой. Величина амплитуды определяется модулем множителя, стоящего в скобках. Частота пульсаций амплитуды (ее называют частотой биеений) равна разности частот складываемых колебаний.

Предположим, что два колебания, имеющие одну и ту же частоту, происходят вдоль координатных осей x и y :

$$x = a \cos \omega t,$$

$$y = b \cos (\omega t + \alpha),$$

где a и b — амплитуды соответствующих смещений; α — разность фаз обоих колебаний.

Уравнение траектории результирующего движения имеет вид

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{2xy}{ab} \cos \alpha = \sin^2 \alpha; \quad (1.2)$$

оно является уравнением эллипса. Ориентация эллипса относительно координатных осей x и y зависит от разности фаз α .

Если частоты взаимно перпендикулярных колебаний неодинаковы, то траектория результирующего движения имеет вид довольно сложных кривых, называемых фигурами

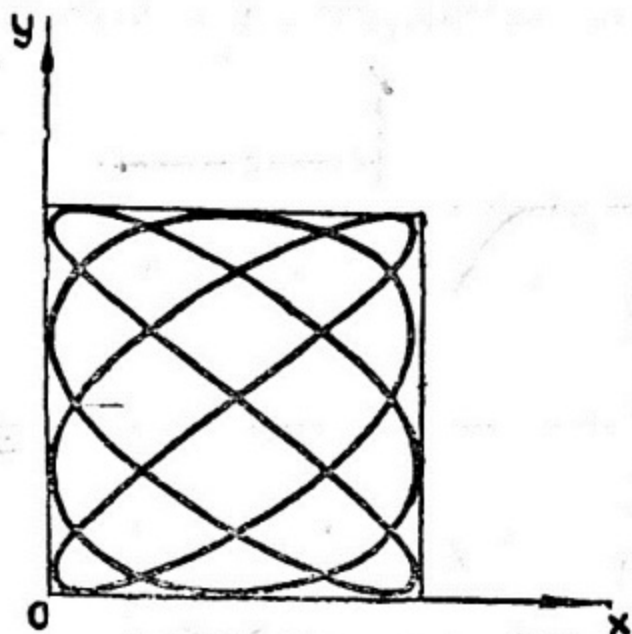


Рис. 1.2.

Лиссажу. На рис. 1.1 показана одна из простейших траекторий, получающаяся при отношении частот 1:2 и разности фаз $\frac{\pi}{2}$. Траектория для отношения частот 3:4 и разности фаз $\frac{\pi}{2}$ показана на рис. 1.2 (оси x и y смещены).

Чем ближе к единице рациональная дробь, выражающая отношение частот колебаний, тем сложнее фигура Лиссажу. Если отношение частот не выражается рациональной дробью, то траектория результирующего движения представляет собой незамкнутую кривую, постепенно заполняющую всю площадь прямоугольника.

ПРАВИЛА РАБОТЫ С ЭЛЕКТРОННЫМ ОСЦИЛЛОГРАФОМ

Основные сведения

Блок-схема осциллографа представлена на рис. 1.3. Основной блок осциллографа — электронно-лучевая трубка, в которой возникает и фокусируется электронный луч. Там же расположены системы, с помощью которых можно управлять движением луча, отклоняя его в вертикальном и горизон-

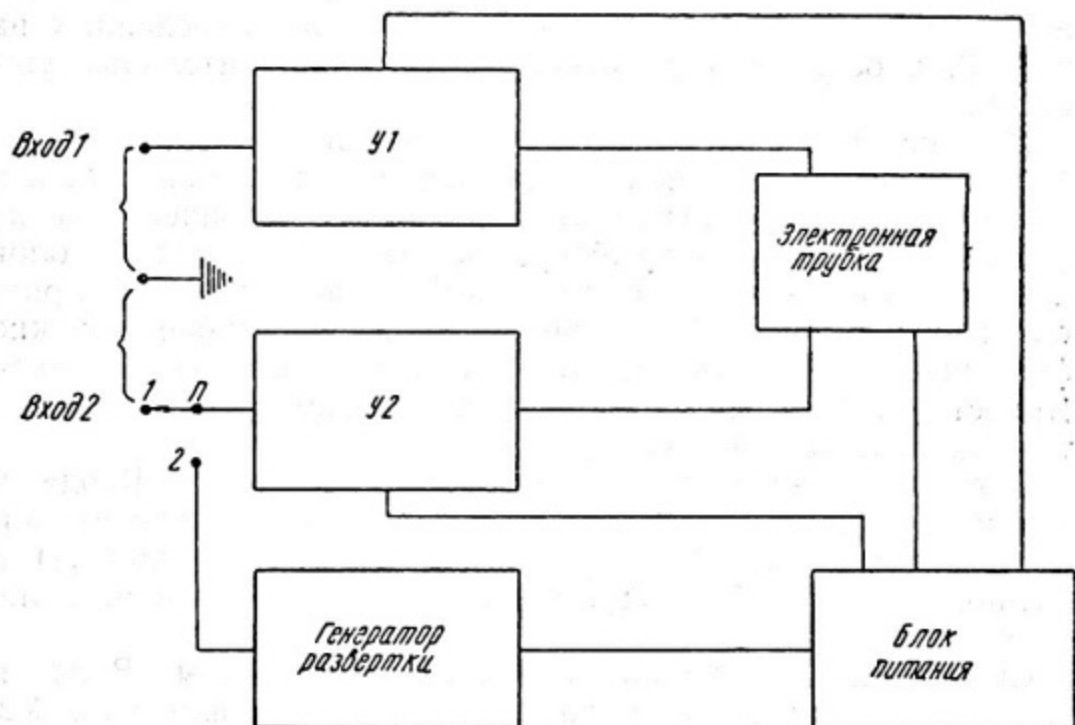


Рис. 1.3.

тальном направлениях. Движущийся луч оставляет на экране трубки, покрытом специальным составом, светящийся след.

Осциллограф имеет два входа (см. рис. 1.3). Сигнал, поданный на вход 1, поступает на усилитель У1, а затем подается на вертикальную отклоняющую систему электронно-лучевой трубки. Сигнал, поданный на вход 2, поступает на усилитель У2, а затем подается на горизонтальную отклоняющую систему электронно-лучевой трубки. В дальнейшем вход 1 будем называть У-входом, вход 2 — Х-входом.

Различают два основных режима работы осциллографа. В первом режиме на Х- и У-входы подаются два внешних сигнала. Переключатель П установлен в положение 1. В ре-

зультате сложения этих сигналов, действующих по двум взаимно перпендикулярным направлениям, на экране электронно-лучевой трубки появляется линия. Во втором режиме на У-вход подается один внешний сигнал. Переключатель П поставлен в положение 2. На усилитель У2 подается выходное напряжение генератора развертки (ГР), обеспечивающее перемещение луча в горизонтальном направлении по линейному закону. На экране электронно-лучевой трубки возникает линия, характеризующая изменение внешнего сигнала во времени. Помимо основных блоков, приведенных на рис. 1.3, в осциллографе используются дополнительные устройства.

На рис. 1.4 изображена передняя панель осциллографа ЭО-7, на которой расположены экран электронно-лучевой трубки и основные ручки управления с обозначениями их функций. С помощью тумблера «Сеть» включается блок питания осциллографа. Тумблер «Луч» включает электронно-лучевую трубку. Луч, генерируемый в трубке, можно сфокусировать ручкой «Фокус» и отрегулировать ручкой «Яркость». Ручки «Ось y » и «Ось x » смещают луч в соответствующих направлениях.

Сигнал на У-вход подается на левые клеммы «Вход» и «Земля». Амплитуда сигнала регулируется усилителем У1, управляемым ручками «Усиление» (плавная регулировка) и «Ослабление» (грубая регулировка), расположенными в левой части панели.

Сигнал на Х-вход подается на правые клеммы «Вход» и «Земля». Амплитуда сигнала регулируется усилителем У2, управляемым ручкой «Усиление» (плавная регулировка), расположенной в правой части панели.

Если осциллограф работает в первом режиме, то переключатель П на рис. 1.1 поставлен в положение 1, чему соответствует установление ручки «Диапазоны частот», управляющей генератором развертки, у метки «Выкл.».

Если осциллограф работает во втором режиме, то переключатель П поставлен в положение 2. В этом случае ручку «Диапазоны частот» нужно установить у метки, примерно соответствующей предполагаемой частоте исследуемого сигнала. Для полного согласования частоты генератора развертки с частотой изменения исследуемого сигнала пользуются ручкой «Частота плавно». Переключатель «Синхронизация» и ручка «Амплитуда синхронизации» служат для синхронизации частоты генератора развертки с частотой сиг-

нала, подаваемого на У-вход. Кроме того, в левой части панели расположена клемма «Контрольный сигнал», к которой подведен источник синусоидальных колебаний с частотой 50 гц.

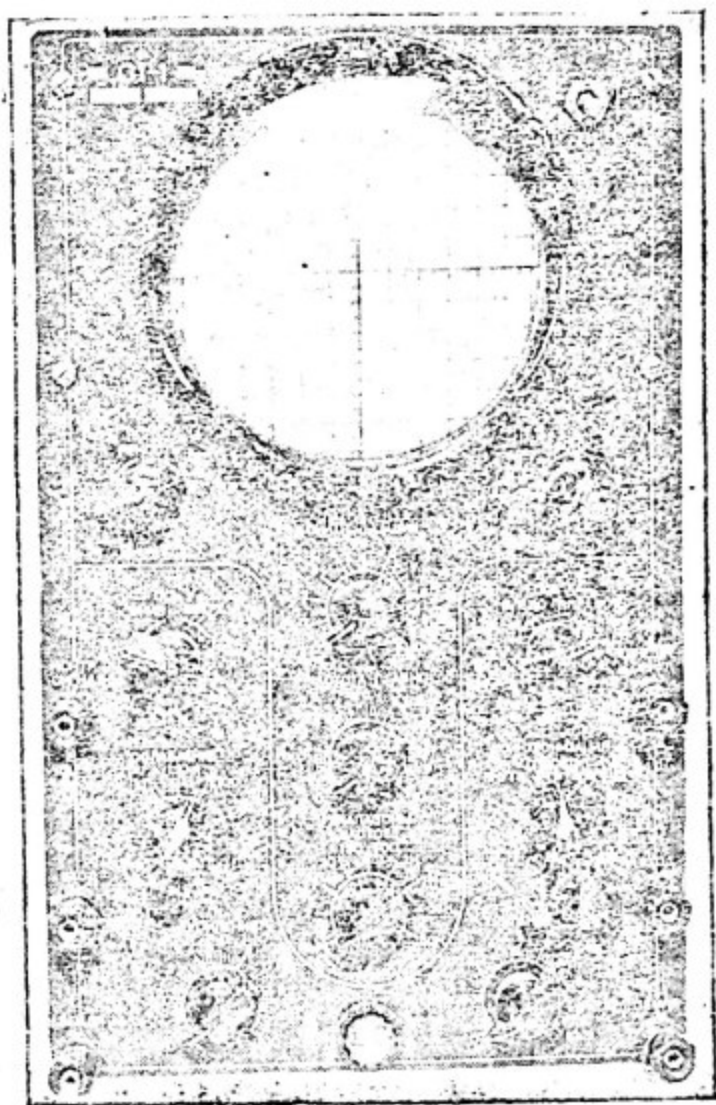


Рис. 1.4.

Включение и настройка осциллографа

Перед включением осциллографа следует установить ручки регулировки в следующие положения: регулятор яркости — в крайнее правое положение (т. е. на максимальную яркость); регулятор фокусировки — в среднее положение;

усиление по оси y — в нулевое положение, усиление по оси x — на два-три деления, переключатель диапазонов развертки — в положение 30—130. Вилку шнура питания включить в сеть. Включить тумблер «Сеть» (верхнее положение), контрольная лампочка на передней панели должна загореться. Прибор прогревается в течение 2—3 мин. Включить тумблер «Луч», при этом на экране должна появиться яркая линия. Линия может не появиться вследствие слишком большого отклонения луча за пределы экрана трубки. Для возвращения луча постепенно устанавливают регулятор положения луча на оси y в разные позиции и в каждой из них поворачивают регулятор положения луча по оси x на полный его ход. После нахождения линии уменьшают яркость и регулируют фокусировку до максимально четкого изображения.

ПРАВИЛА РАБОТЫ С ЗВУКОВЫМ ГЕНЕРАТОРОМ ЗГ-12М

Основные сведения

Блок-схема звукового генератора (ЗГ) приведена на рис. 1.5. В задающем генераторе возбуждаются синусо-

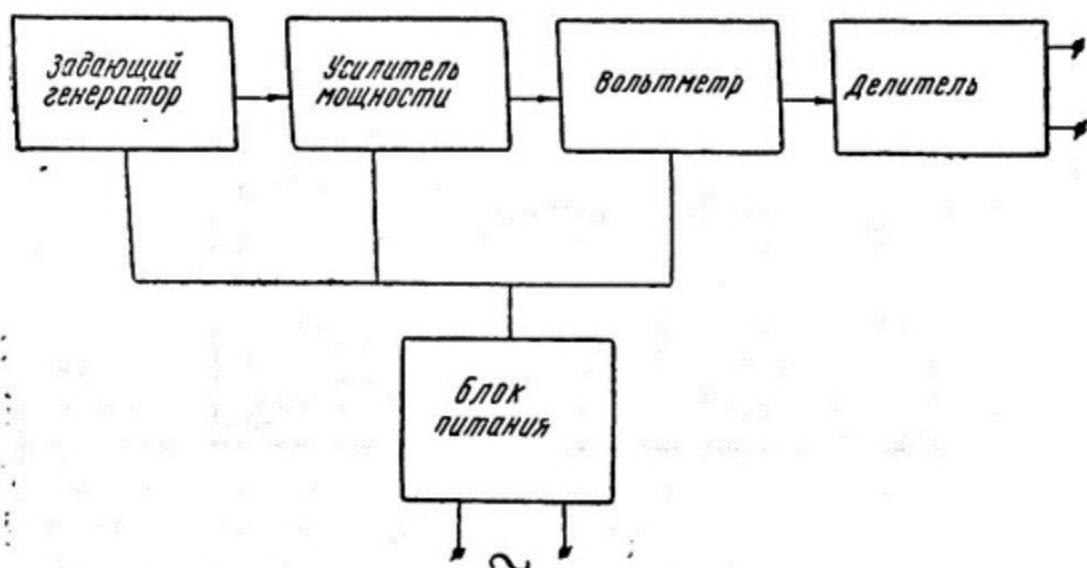


Рис. 1.5.

идальные электрические колебания, частота которых 20—200 000 гц в зависимости от настройки. Амплитуда колебаний регулируется усилителем мощности. Затем колебания подаются на вольтметр и на делитель напряжения (аттенюа-

тор), который ослабляет выходное напряжение до 100 дб. Питание генератора производится от сети переменного тока напряжением 220 в.

Ручки управления звуковым генератором выведены на его панель (рис. 1.6). Частота колебаний устанавливается поворотом ручки переключателя «Множитель» (ступенчатая

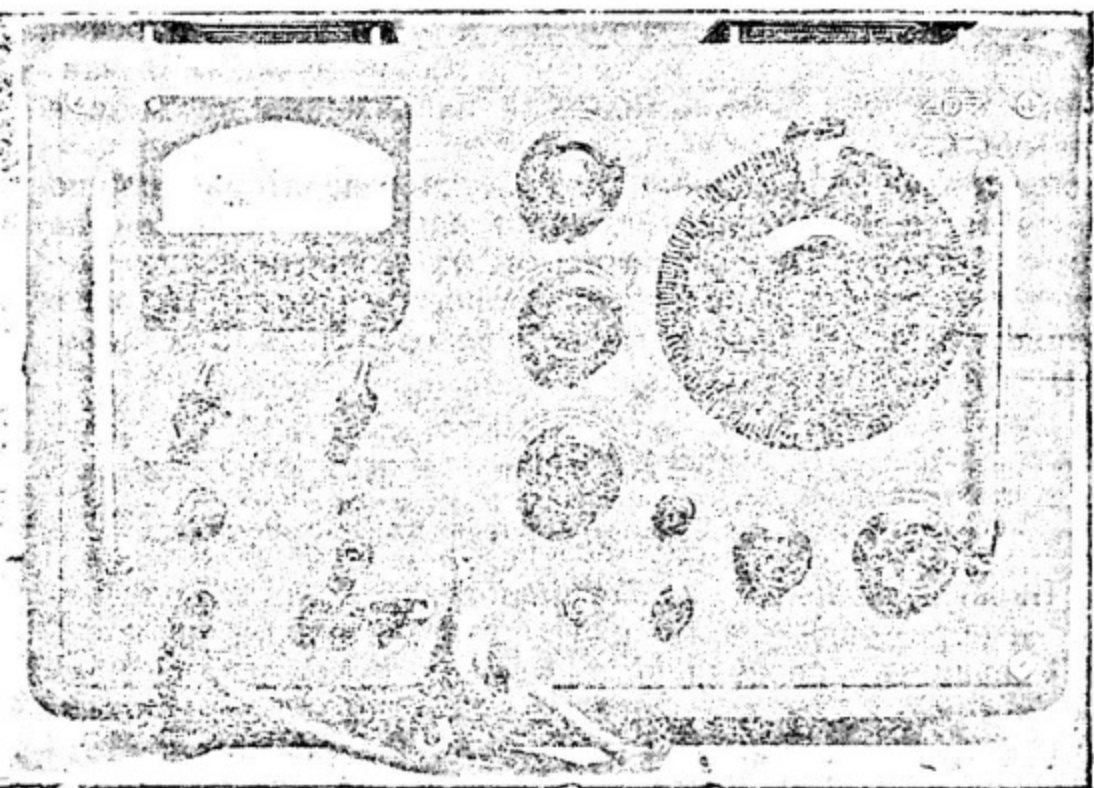


Рис. 1.6.

регулировка) и поворотом лимба (плавная регулировка). Для определения частоты генератора в герцах нужно отсчет по шкале лимба умножить на показания переключателя «Множитель». Вращением ручки «Расстройка, %» можно плавно изменять частоту в пределах $\pm 1,5\%$ от установленной.

Возбуждаемые в генераторе колебания подаются на клеммы «Выход». Напряжение на выходе регулируется ручкой «Рег. вых. напр.» (плавная регулировка) и «Затухание, дб» (ступенчатая регулировка).

Включение генератора

Вилку шнура питания включить в сеть переменного тока напряжением 220 в. Тумблер включения сети поставить в положение «Вкл.», при этом должна загореться сигнальная лампочка. К работе следует приступить после предварительного прогрева в течение 20—30 мин.

После прогрева генератора ручкой «Множитель» и поворотом лимба установить нужную частоту. С помощью ручки «Рег. вых. напр.», а при необходимости и ручки «Затухание, дб» отрегулировать амплитуду напряжения на выходе генератора*.

Спротивление выходного устройства генератора должно быть согласовано с сопротивлением нагрузки, поданной на клеммы «Выход». Переключатель «Вых. сопротивление» необходимо поставить в положение, наиболее соответствующее величине нагрузки (по указанию преподавателя или лаборанта).

ЗАДАНИЯ

1. Изучение режимов работы электронного осциллографа

1. Включить электронный осциллограф в сеть и получить четкое изображение электронного луча на экране трубки.

2. Соединить проводником клемму «Контр. сигнал» с клеммой «У-вход», переключатель «Ослабление» установить в положение 1:1, переключатель «Диапазон частот» в положение 30—130. Вращением ручек «Частота плавно» и «Амплитуда синхронизации» получить неподвижную картину развертки контрольного сигнала во времени (переключатель «Синхронизация» установить в положение «Сеть» или «Внутр.»). Регуляторами усиления по осям x и y установить желаемые размеры изображения. Исследовать влияние различных регуляторов на изображение. Изменяя частоту развертки, получить на экране осциллографа 0,5; 1; 2; 3; 4 и т. д. полных колебания. Зарисовать полученные изображения.

3. Включить звуковой генератор в сеть. После прогрева подключить выход звукового генератора на У-вход осциллографа, а контрольный сигнал на Х-вход. Выключить генератор развертки и получить на экране осциллографа кривые,

* В работах II семестра напряжение на выходе генератора количественно не измеряется.

возникающие в результате сложения двух взаимно перпендикулярных колебаний от контрольного сигнала и звукового генератора (фигуры Лиссажу). Отношение частот складываемых колебаний должно быть равным 1:1, 1:2, 1:3, 2:3, 3:4 и т. д. Зарисовать наблюдаемые фигуры (пример показан на рис. 1.1).

Проверить правило, часто используемое для определения отношения частот. Если фигуру Лиссажу ограничить координатными осями x и y , как показано на рис. 1.2, и подсчитать число касаний фигуры с осью y , равное n_y и осью x , равное n_x , то частоты колебаний ν_x и ν_y связаны отношением

$$\frac{\nu_y}{\nu_x} = \frac{n_x}{n_y}.$$

2. Управление амплитудой колебаний звукового генератора

1. Отключить контрольный сигнал от X-входа осциллографа. Колебания со звукового генератора оставить на У-входе. Получить на экране осциллографа вертикальную линию, длина которой пропорциональна амплитуде колебаний напряжения звукового генератора. Поворачивая на панели генератора ручки «Затухание, дб», наблюдать изменение амплитуды колебаний генератора. Показания переключателей «Затухание, дб» определяют затухание, т. е. отношение интенсивности колебаний на выходе ЗГ к интенсивности колебаний, подаваемых на вольтметр. Общее затухание равно сумме децибел, показанных на трех переключателях.

2. В децибелах может быть выражено отношение двух любых интенсивностей I_1 и I_0 :

$$L_{12} = 10 \lg \frac{I_1}{I_2}. \quad (1.3)$$

Известно, что интенсивность пропорциональна энергии колебаний, а энергия пропорциональна произведению квадрата амплитуды на квадрат частоты колебаний. Следовательно:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{a_1^2 \nu_1^2}{a_2^2 \nu_2^2}. \quad (1.4)$$

Если $\nu_1 = \nu_2$, то

$$L_{12} = 20 \lg \frac{a_1}{a_2}.$$

3. Выключить ручки «Затухание, дб» и, пользуясь ручкой «Рег. вых. напр.», получить на экране осциллографа вертикальную прямую наибольшей длины, удобной для измерения. Ручку «Ослабление» осциллографа поставить в положение 1:1. Измерить длину прямой a_0 в делениях координатной сетки на экране. Ввести затухание 10, 20, 30 дб, измеряя каждый раз длину амплитуды a_1, a_2, a_3, \dots напряжения генератора.

Вычислить отношения $\frac{a_1}{a_0}, \frac{a_2}{a_0}, \frac{a_3}{a_0}, \dots$. По формуле (1.4) рассчитать затухание и оценить ошибку измерений. Сравнить полученные результаты с затуханием, определяемым по показаниям ручек «Затухание, дб». Оценить правильность калибровки положений ручек.

3. Получение и исследование биений

Биения можно получить и наблюдать на экране осциллографа, если соединить звуковой генератор, генератор постоянной частоты Γ_x и осциллограф по схеме, изображенной

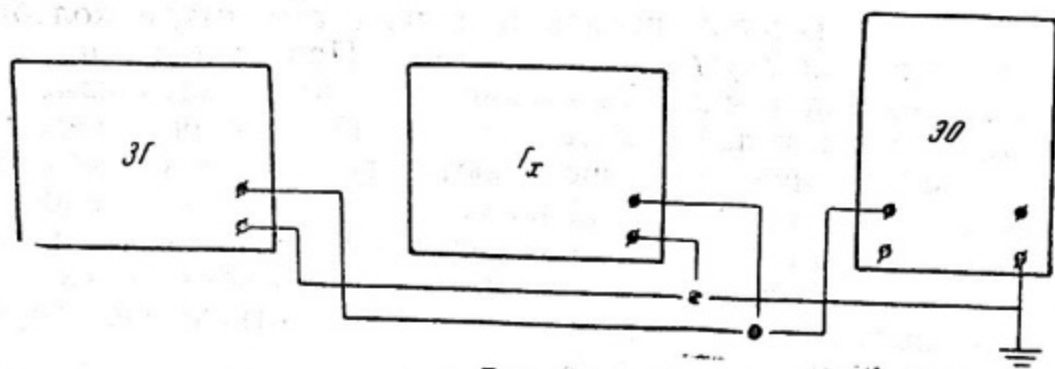


Рис. 1.7.

на рис. 1.7. Условием получения отчетливой осциллограммы биений является равенство амплитуд складываемых колебаний. Уравнять наблюдаемые на экране амплитуды можно следующим образом.

1. Подключить на У-вход осциллографа генератор Γ_x . Регулируя усиление по y , добиться, чтобы двойная амплитуда его колебаний, наблюдаемая на экране, не превышала 4 см по вертикали.

2. Подключить на У-вход осциллографа звуковой генератор. Не меняя положения ручек усиления осциллографа, получить изображение колебаний ЗГ на экране. Устано-

вить амплитуду колебаний ЗГ. равной амплитуде колебаний Γ_x , регулируя ее ручкой «Рег. вых. напр.». Ручки «Затухание, дб» поставить на нуль.

Собрать электрическую цепь по схеме, изображенной на рис. 1.7. Плавно изменяя частоту ЗГ в пределах, указанных на передней панели генератора Γ_x , на экране осциллографа несколько раз можно наблюдать картины биений. Для определения частоты генератора Γ_x нужно получить биения два раза. Один раз при частоте ЗГ ν_1 , немного меньшей частоты генератора Γ_x . В этом случае частота биений равна $\nu'_6 = \nu_x - \nu_1$. Второй раз при частоте ЗГ ν_2 , большей частоты генератора ν_x , и притом такой, чтобы частота биений $\nu''_6 = \nu_2 - \nu_x$ совпала с частотой ν'_6 . Если частоты биений совпадают, то частота генератора Γ_x равна

$$\nu_x = \frac{\nu_1 + \nu_2}{2}. \quad (1.5)$$

Получить и зарисовать две осциллограммы биений. Отметить на рисунках соответствующие частоты ЗГ ν_1 и ν_2 . Если частоты биений равны, то равны и периоды пульсаций амплитуды, что легко установить, сравнивая осциллограммы. Рассчитать частоту ν_x по формуле (1.5).

Повторить эксперимент по определению частоты ν_x для трех различных значений частот ν_6 . Найти ее среднее значение и оценить ошибку измерений.

4. Определение частоты колебаний по фигурам Лиссажу

Включить генератор ЗГ на У-вход осциллографа, а генератор Γ_x на Х-вход и несколько раз определить частоту ν_x по различным фигурам Лиссажу, пользуясь правилом, изложенным в задании 1. Зарисовать фигуры Лиссажу, по которым определялась частота. Сравнить частоту, определенную по фигурам Лиссажу, со значением частоты, определенным по биениям. Оценить ошибку измерений.

Работа 2

ИЗУЧЕНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ ФИЗИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

ВВЕДЕНИЕ

Движению маятника оказывают сопротивление среда, в которой он колеблется, и силы трения в оси. На преодоление этого сопротивления расходуется энергия, и колебания маятника постепенно затухают. При небольших отклонениях от положения равновесия затухающие колебания описываются функцией

$$x(t) = a_0 e^{-\beta t} \cos\left(2\pi \frac{t}{T} + \alpha\right), \quad (2.1)$$

где $x(t)$ — смещение; T — период; a_0 — начальная амплитуда; α — начальная фаза затухающих колебаний маятника; β — коэффициент затухания колебаний.

Амплитуда затухающих колебаний

$$a(t) = a_0 e^{-\beta t} \quad (2.2)$$

убывает со временем тем быстрее, чем больше коэффициент затухания. Из выражения (2.2) для амплитуды затухающих колебаний следует, что

$$\beta = \frac{1}{t} \ln \frac{a_0}{a(t)}. \quad (2.3)$$

Если за время t' амплитуда убывает в e раз, то

$$\beta = \frac{1}{t'}.$$

На рис. 2.1 представлен график затухающих колебаний. Затухающие колебания характеризуются логарифмическим декрементом затухания

$$\lambda = \ln \frac{a(t)}{a(t+T)}. \quad (2.4)$$

Пользуясь формулами (2.2) и (2.3), можно найти:

$$\lambda = \beta T. \quad (2.5)$$

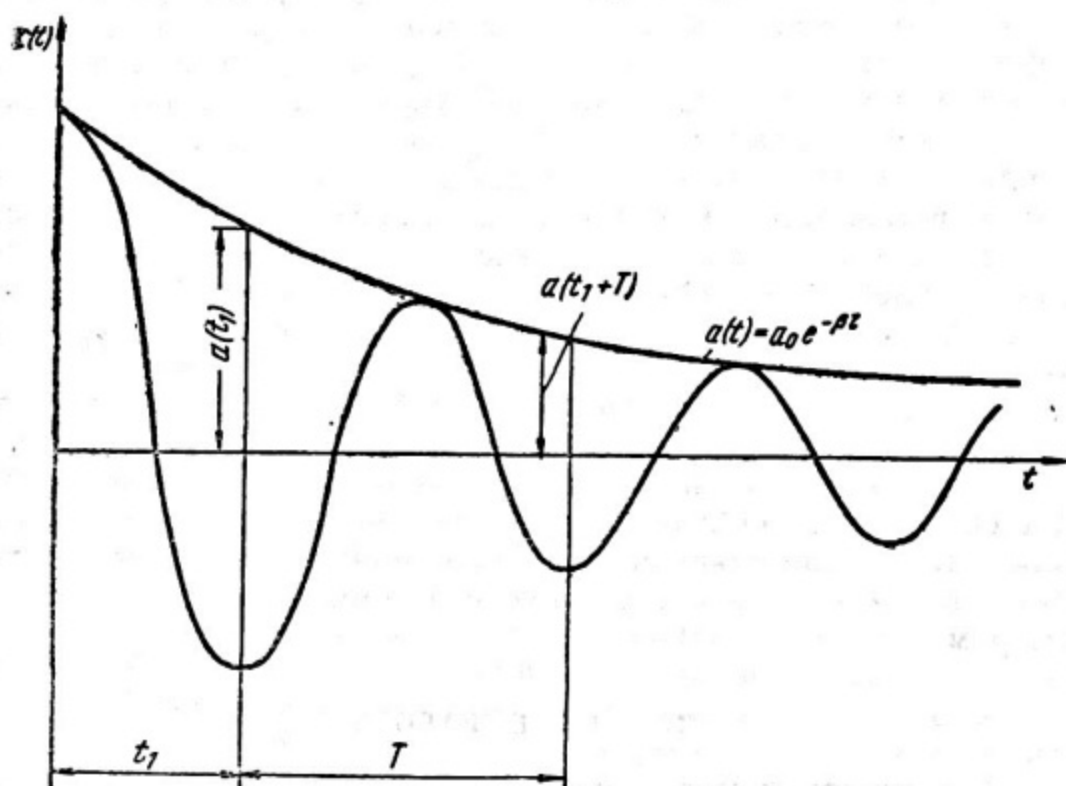


Рис. 2.1.

Если известны значения амплитуд, разделенных интервалом времени, кратным периоду, то

$$\lambda = \frac{1}{n} \ln \frac{a(t)}{a(t+nT)}, \quad (2.6)$$

где n — число полных колебаний в интервале времени nT .

Если за время $t' = nT$ амплитуда колебаний убывает в e раз, то

$$\lambda = \frac{1}{n}.$$

В теории колебаний устанавливается связь между периодами T и T_0 затухающих и свободных гармонических колебаний:

$$T = T_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2}. \quad (2.7)$$

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Приборы и принадлежности: лабораторная установка с физическим маятником, секундомер.

Физический маятник состоит из длинной металлической штанги, у нижнего конца которой укреплен чугунный диск. Верхний конец штанги снабжен призмой, которая опирается на плиту, укрепленную на кронштейне. В нижний конец штанги вставляется металлическая лопатка с указателем. Лопатку можно погрузить в бак с водой для усиления затухания колебаний. Отсчет угла отклонений маятника производится по градусной шкале, расположенной на уровне указателя.

Установка имеет простое приспособление для начального отклонения маятника, которое в значительной мере устраняет нежелательные поперечные колебания. Оно представляет собой барабан с намотанной на него нитью, который стопорится с помощью скобы. Нить привязывается к маятнику и пережигается при его пуске. Время измеряется секундомером.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Продумать и подготовить таблицу для записи результатов измерений.

2. Установить нуль шкалы против указателя маятника, находящегося в положении равновесия. С помощью барабана отклонить маятник, установить его указатель против 14-го деления шкалы. Пережигая нить, включить секундомер и измерить время, за которое амплитуда колебаний уменьшится от 14 до 13 делений, одновременно отсчитывая число полных колебаний.

Те же измерения провести последовательно в интервалах делений 13—12 и т. д. до 10—9 делений шкалы (не менее трех раз в каждом интервале).

3. Пять раз измерить время убывания амплитуды колебаний в e раз, одновременно считая число полных колеба-

ний. Такие измерения удобно проводить, наметив конечную амплитуду колебаний, выраженную целым числом делений шкалы. Например, предположим, что $a_2 = 5$ делениям, тогда $a_1 = 13,56$ деления. Отведем маятник примерно на 14—15 делений, пережжем нить и проследим, когда указатель достигнет максимального отклонения, 13,6 или 13,5 деления. В этот момент включим секундомер и начнем счет полных колебаний. Измерение времени и счет колебаний заканчиваем при достижении указателем максимального отклонения, 5 делений.

4. Погрузить лопатку маятника в бак с водой, провести измерение времени убывания амплитуды колебаний в интервалах делений шкалы 14—10; 10—7; 7—5; 5—3; 3—3.

5. Повторить измерения, указанные в п. 3, для колебаний лопатки маятника в воде.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. На одном листе миллиметровой бумаги построить графики зависимости амплитуды затухающих колебаний от времени для маятника, колеблющегося в воздухе, и маятника с лопаткой, погруженной в воду.

Рассчитать T , β и λ для трех интервалов амплитуд (в начале, в середине и в конце графика), используя формулы (2.3) и (2.6).

2. На одном листе построить графики зависимости десятичного логарифма затухающих колебаний от времени для маятника, колеблющегося в воздухе, и для маятника с лопаткой, погруженной в воду. Для построения желательно использовать миллиметровую бумагу с полулогарифмическим масштабом.

По наклону $\lg a(t)$ к оси времени определить коэффициент затухания β , воспользовавшись соотношением

$$\lg a(t) = \lg a_0 - \beta t \lg e.$$

Коэффициент затухания определить для тех же интервалов, что и в п. 1. Вычислить среднее значение коэффициента затухания и рассчитать по формуле (2.5) логарифмический декремент затухания.

3. Определить значения β и λ для колебаний маятника в воздухе и для колебаний с лопаткой, погруженной в воду, если амплитуда убывает в e раз.

4. Сравнить все полученные значения β и λ . Определить погрешности измерений.

5. Пользуясь соотношением (2.7), оценить влияние затухания на изменение периода колебаний маятника.



Работа 3

ИЗУЧЕНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ С ПОМОЩЬЮ МАЯТНИКА ПОЛЯ

ВВЕДЕНИЕ

Движение, совершаемое колебательной системой под воздействием внешней гармонической силы, описывается уравнением

$$x(t) = a \cos(\omega t + \alpha), \quad (3.1)$$

где a — амплитуда вынужденных колебаний; ω — частота вынуждающей силы; α — сдвиг фаз между смещением и внешней периодической силой. Частота установившихся вынужденных колебаний равна частоте внешнего воздействия.

Аналитические выражения для амплитуды a и сдвига фаз α имеют вид

$$a(\omega) = \frac{F_0/m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}}; \quad (3.2)$$

$$\operatorname{tg} \alpha(\omega) = \frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2},$$

где F_0 — амплитуда вынуждающей силы; m — масса колеблющейся системы; ω_0 — собственная частота колебаний системы.

Зависимости амплитуды a и сдвига фаз α от частоты ω вынуждающей силы при различных коэффициентах затухания ($\beta_1 < \beta_2$) представлены на рис. 3.1 и 3.2. Амплитуда вынужденных колебаний достигает максимального значения

при резонансе, когда частота вынуждающей силы оказывается равной резонансной частоте:

$$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}.$$

В случае слабого затухания ($\beta \ll \omega_0$) резонансная частота практически совпадает с частотой собственных колебаний:

$$\omega_{\text{рез}} \approx \omega_0.$$

При малых частотах вынуждающей силы $\omega \ll \omega_0$ и больших $\omega \gg \omega_0$ сдвиг фаз α равен соответственно 0 и $-\pi$;

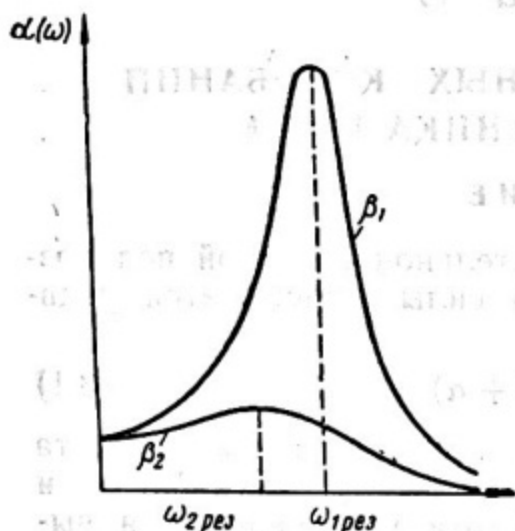


Рис. 3.1.

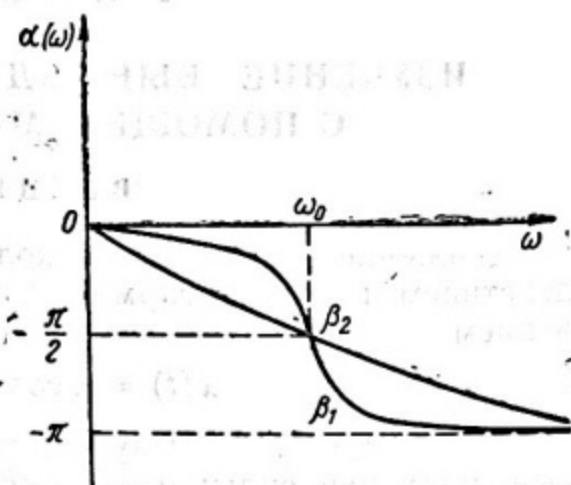


Рис. 3.2.

вблизи резонанса $\alpha \approx -\frac{\pi}{2}$ *. В стадии установления вынужденных колебаний характер движения системы сложен. Время установления вынужденных колебаний принимается приблизительно равным $1/\beta$.

В настоящей работе исследуется зависимость амплитуды установившихся вынужденных колебаний от частоты вынуждающей силы. Кроме того, наблюдается характер установления вынужденных колебаний и производится качественная оценка сдвига фаз α при малых и больших частотах вынуждающей силы, а также вблизи резонанса.

* Колебания, описываемые уравнением (2.1), возникают не сразу. Вначале, после включения вынуждающей силы происходит процесс установления колебаний. При этом амплитуда колебаний постепенно возрастает от нуля до установившегося значения, определяемого формулой (3.2).

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Исследование вынужденных механических колебаний производится с помощью маятника Поля. Схематическое изображение установки приведено на рис. 3.3.

Маятник Поля представляет собой металлический диск D , совершающий крутильные колебания вокруг горизонтальной

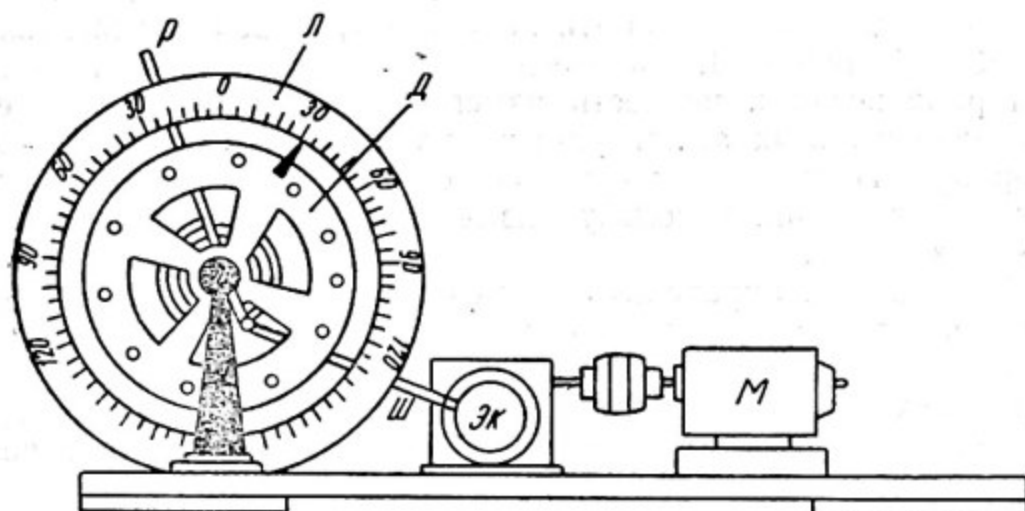


Рис. 3.3.

неподвижной оси под действием спиральной пружины. Одним концом пружина жестко соединена с диском маятника, другим — с рычагом P , колеблющимся вокруг той же горизонтальной оси. Периодическое воздействие на диск передается от вала мотора M посредством системы, состоящей из червячной передачи $Ч$, эксцентрика $Эк$, шатуна $Ш$, рычага P и пружины.

Электромотор питается от сети через автотрансформатор. Изменением выходного напряжения на клеммах автотрансформатора можно варьировать скорость вращения вала электромотора и, следовательно, частоту вынужденных колебаний маятника. Затухание колебаний маятника вызывается взаимодействием вихревых токов в диске с магнитным полем электромагнита, между полюсами которого колеблется диск. Реостат, включенный в цепь электромагнита, дает возможность регулировать силу тока в обмотках электромагнита и тем самым изменять затухание колебаний диска. Диск маятника снабжен указателем; амплитуды колебаний диска отсчитываются по шкале лимба $Л$.

1. Определение частоты собственных затухающих колебаний маятника

При выключенных электромоторе и электромагните отклонить диск от положения равновесия на $90-120^\circ$ и отпустить его. В момент амплитудного отклонения диска включить секундомер и измерить не менее трех раз время десяти колебаний диска. Вновь вывести диск маятника из положения равновесия и провести измерения примерно десяти его последовательных амплитудных отклонений (в одну и ту же сторону). Построить график зависимости логарифма амплитуды от времени, используя измеренный ранее период затухающих колебаний.

Из графика определить коэффициент затухания маятника (см. работу 2). Рассчитать период или частоту свободных незатухающих колебаний и сравнить с периодом или частотой затухающих колебаний маятника. Аналогичные измерения провести при включенном электромагните. (Токи в цепи электромагнита: $I_1 = 0,3 \text{ а}$; $I_2 = 0,6 \text{ а}$.)

2. Построение графиков резонансных кривых амплитуды вынужденных колебаний

При выключенном электромагните включить электромотор на малых оборотах. Выждав пока установятся вынужденные колебания диска, измерить их период и амплитуду (не менее трех раз). Эти измерения провести при различных периодах вынуждающей силы, изменяя выходное напряжение на клеммах автотрансформатора. Вблизи резонансной частоты измерения проводить с малым интервалом изменения частоты, чтобы более точно передать характер резонансной кривой в области резонанса. Аналогичные измерения провести при включенном электромагните ($I_1 = 0,3 \text{ а}$; $I_2 = 0,6 \text{ а}$).

По результатам измерений на одном листе построить графики зависимости амплитуды вынужденных колебаний от частоты вынуждающей силы при выключенном электромагните и при токах $I_1 = 0,3 \text{ а}$ и $I_2 = 0,6 \text{ а}$. Из графиков определить резонансные частоты и сравнить их со значениями, полученными в задании 1.

3. Качественная оценка сдвига ФАЗ

При выключенном электромагните включить электродвигатель на малых оборотах ($\omega < \omega_0$) и проследить за относительным движением указателей диска и рычага. То же самое сделать при больших оборотах вала электродвигателя ($\omega > \omega_0$) и вблизи резонанса ($\omega \approx \omega_0$). Сделать соответствующие выводы о величине сдвига фаз α вынужденных колебаний (по движению указателя диска) и вынуждающей силы (по движению указателя рычага).

4. Наблюдение характера установления вынужденных колебаний

При включенном электромагните ($I = 0,6$ а) установить частоту вращения вала электродвигателя близкой к резонансной. Задержав диск маятника в положении равновесия или, наоборот, отклонив его от положения равновесия, измерить по секундомеру время установления вынужденных колебаний, одновременно наблюдая характер этого установления. Сравнить измеренное время установления с величиной, обратной коэффициенту затухания $\frac{1}{\beta}$, при $I = 0,6$ а. Аналогичные наблюдения и измерения провести при частотах вращения вала электродвигателя $\omega < \omega_0$ и $\omega > \omega_0$.

Работа 4

ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СТРУНЫ МЕТОДОМ РЕЗОНАНСА

ВВЕДЕНИЕ

В натянутой между двумя точками струне при возбуждении колебаний устанавливаются стоячие волны. Так как точки закрепления струны являются узлами стоячих волн, то в струне возбуждаются колебания лишь таких частот, при которых на длине струны l укладывается целое число полу-волн.

Отсюда

$$l = n \frac{\lambda}{2} \text{ или } \lambda_n = \frac{2l}{n} \\ (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (4.1)$$

где l — длина струны.

Учитывая связь скорости распространения колебаний v с частотой и длиной волны:

$$v = \lambda \nu,$$

получаем

$$\nu_n = \frac{n}{2l} v. \quad (4.2)$$

Скорость распространения поперечных колебаний вдоль струны определяется по формуле

$$v = \frac{2}{d} \sqrt{\frac{P}{\pi \rho}}, \quad (4.3)$$

где P , d , ρ — натяжение, диаметр и плотность материала струны соответственно. Подставляя значение скорости в фор-

мулу (4.2), получаем окончательное выражение для собственных частот колебаний струны:

$$\nu_n = \frac{n}{ld} \sqrt{\frac{P}{\pi \rho}}. \quad (4.4)$$

Самая низкая собственная частота (или самый низкий тон, издаваемый струной)

$$\nu_1 = \frac{1}{ld} \sqrt{\frac{P}{\pi \rho}}$$

называется основной частотой или *основным тоном*. Более высокие частоты, кратные ν_1 , называются *обертнами* или гармониками. Основная частота называется первой гармоникой, удвоенная основная частота или первый обертон — второй гармоникой и т. д.

Приняв за начало координат одну из точек закрепления и направив ось x вдоль струны, запишем уравнение n -й стоячей волны:

$$\xi_n = a_n \sin \frac{2\pi x}{\lambda_n} \sin 2\pi \nu_n t,$$

где a — постоянная; $\lambda_n = \frac{2l}{n}$; ξ_n — поперечное отклонение точки струны с абсциссой x в момент t .

На рис. 4.1 представлены последовательные (через четверть периода) положения трех струн с установившимися стоячими волнами, частоты которых соответствуют основному тону ($n=1$), первому ($n=2$) и второму ($n=3$) обертонам. Профиль стоячей волны в любой момент времени представляет собой синусоиду. Частоты колебаний всех точек струны одинаковы и определяются по формуле (4.4). Итак, струна, закрепленная на двух концах, не может находиться в простом гармоническом колебании с любой частотой; допустимы лишь частоты, определяемые формулой (4.4).

В общем случае в струне могут установиться одновременно колебания самых различных частот, но кратных основной частоте, так как струна представляет собой систему с гармоническими обертонами.

В настоящей работе определяются собственные частоты, производится наблюдение формы собственных колебаний струны при фиксированном ее натяжении и исследуются зависимости скорости распространения поперечных колебаний в струне от ее натяжения.

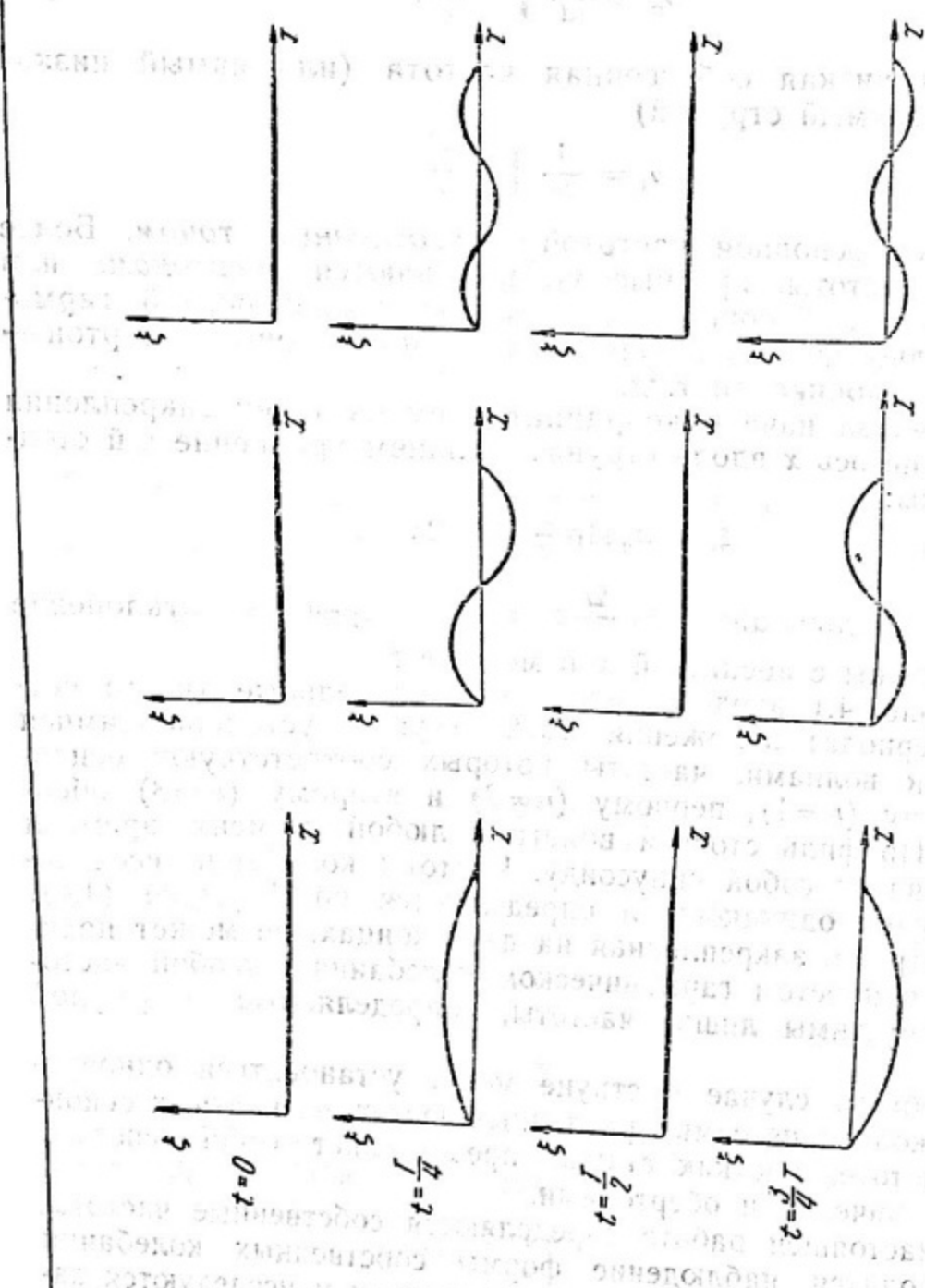


Рис. 4.1.

В работе собственные колебания струны исследуются методом резонанса. Явление резонанса заключается в следующем: если частота вынуждающей силы, периодической во времени и приложенной к малому участку струны, становится равной одной из собственных частот струны, то в ней устанавливаются стоячие волны заметной амплитуды колебаний. При этом необходимо, чтобы участок приложения вынуждающей силы совпадал с одной из пучностей соответствующей стоячей волны.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Приборы и принадлежности: закрепленная на штативе медная струна с подставкой для грузов, набор разновесок, генератор электрических колебаний, магнит, микрометр, масштабная линейка.

В схеме установки, представленной на рис. 4.2, струна натягивается на некоторой высоте между стойками подставки. Один ее конец закреплен неподвижно, а к другому концу, перекинутому через блок, прикреплена чашка с грузами, с помощью которых в струне создается натяжение.

От генератора электрических колебаний на струну подается переменное напряжение. Вдоль струны, по подставке, на которой она укреплена, может свободно перемещаться магнит.

Участок струны с текущим по нему переменным током попадает в поле постоянного магнита, в котором возникает периодическая сила, приложенная к струне. Частота изменения этой силы равна частоте переменного тока.

В том случае, когда частота генератора будет совпадать с одной из собственных частот струны, а положение полюсов магнита — с пучностью стоячей волны, соответствующей данной частоте, наблюдается явление резонанса: на струне устанавливается стоячая волна.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Включить генератор звуковых частот.
2. Создать натяжение в струне, поместив на чашку для грузов какой-либо разновесок*.

* При определении натяжения учитывается вес чашки.

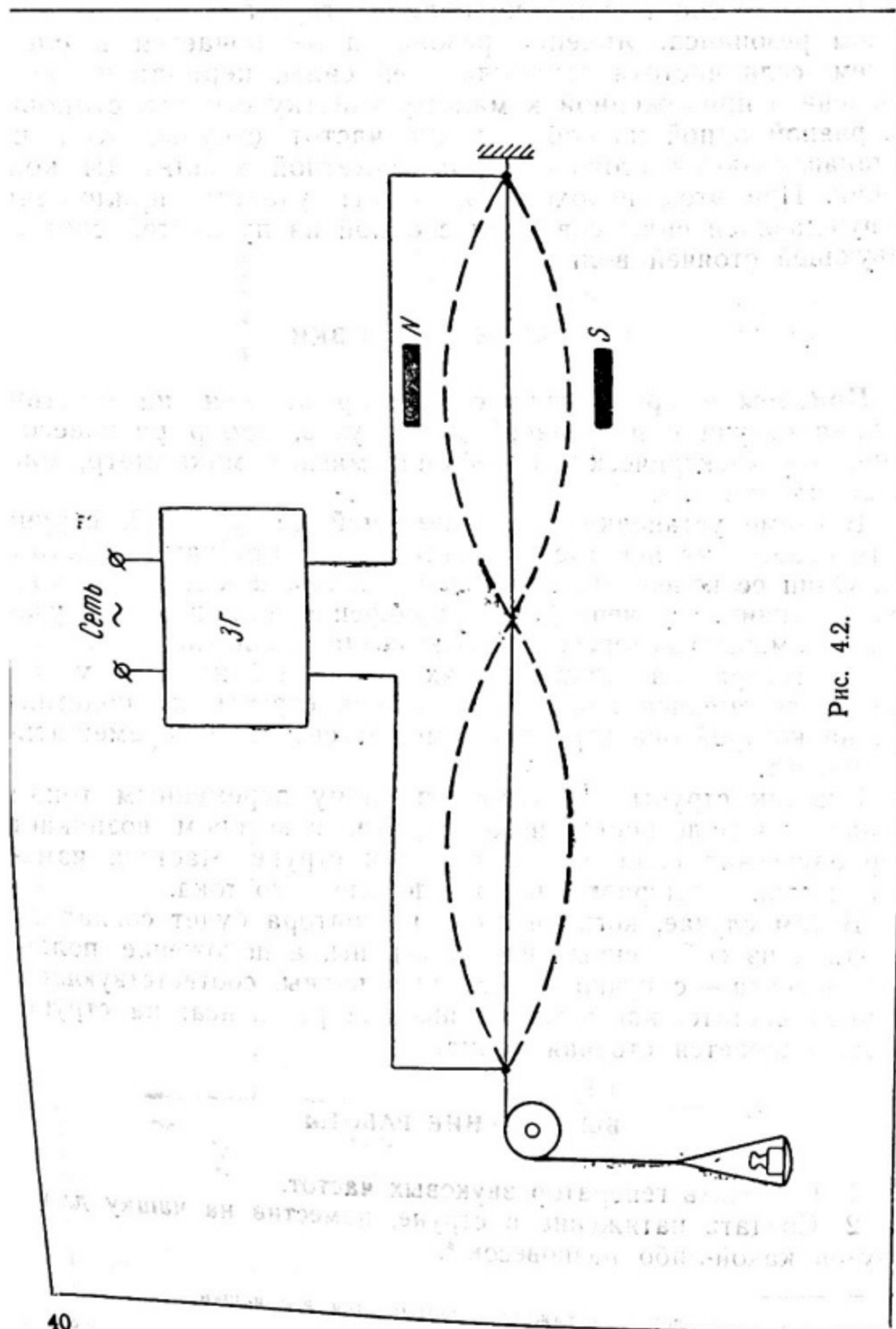


Рис. 4.2.

Результаты исследований колебаний струны

Натяжение струны	Номер собственного колебания струны	Форма собственного колебания струны	Собственная частота ν_n		Скорость распространения поперечных колебаний		Примечания
			показания по лимбу генератора $\nu \pm \Delta \nu$	$\nu_n = \frac{n}{ld} \sqrt{\frac{P}{\pi \rho}}$	по экспериментальным данным $v \pm \Delta v$	по формуле $v = \frac{2}{d} \sqrt{\frac{P}{\pi \rho}}$	
$P_1 =$	1 2 3 и т. д.						
$P_2 =$	1 2 3 и т. д.						
$P_3 =$	1 2 3 и т. д.						
и т. д.							

3. Измерить диаметр рабочей части струны в различных участках, а также ее длину.

4. Установив магнит посередине струны и плавно изменяя частоту вращением лимба генератора (при определенном положении переключателя «Множитель»), добиться устойчивых колебаний основного тона. Затем, передвигая магнит, получить устойчивые колебания последующих обертонов. Если амплитуды колебаний очень малы, следует увеличить выходное напряжение на генераторе.

5. Запись в таблицу (см. стр. 41) в порядке возрастания значений частоты звукового генератора, при которых на струне устанавливаются стоячие волны. Вычертить профили стоячих волн.

6. Изменить первоначальное натяжение струны. В результате этого изменяется скорость распространения поперечных колебаний и набор собственных частот. Провести измерения согласно п.п. 4 и 5 при других натяжениях. Рекомендуется варьировать натяжение струны в пределах от 50 до 250 Г.

7. По формуле (4.4) рассчитать значения собственных частот колебаний струны при различных ее натяжениях. Вычисленные таким образом значения частот занести в таблицу и сопоставить их со значениями, полученными на опыте. Объяснить расхождения.

8. По экспериментальным данным рассчитать скорости распространения поперечных колебаний для каждого натяжения струны, используя формулу (4.2).

9. Найти погрешность измерений.

10. По полученным данным построить график зависимости скорости распространения колебаний от натяжения струны. На этом же чертеже построить график теоретической зависимости скорости от натяжения.

				Средняя скорость распространения поперечных колебаний
				$v = \frac{\lambda}{T}$
1	2	3	4	
5	6	7	8	
9	10	11	12	

Работа 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ И МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ЮНГА МЕТОДОМ РЕЗОНАНСА

ВВЕДЕНИЕ

Скорость продольных упругих волн в твердой среде связана с модулем Юнга среды E и ее плотностью ρ соотношением

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (5.1)$$

В данной работе методом резонанса измеряется скорость продольных волн в твердых стержнях и по формуле (5.1) вычисляется модуль Юнга.

Если на одном конце стержня в направлении его оси действует периодическая сила, то вдоль стержня будет распространяться волна деформации (сжатия — растяжения), которая интерферирует с волной, отраженной от другого его конца. В результате, если частота внешнего воздействия совпадает с одной из частот собственных колебаний стержня, возникает стоячая волна. При этом амплитудные смещения элементов стержня достигают наибольших значений. Если оба конца стержня не закреплены, то на его торцах образуются пучности смещений (узлы деформаций). Между ними, очевидно, располагаются узлы смещений (пучности деформаций).

Возможные распределения смещений в резонирующем стержне указаны на рис. 5.1. Сплошные кривые соответствуют наибольшим смещениям элементов стержня при его

продольных колебаниях, пунктирные — тем же смещениям, но через полпериода.

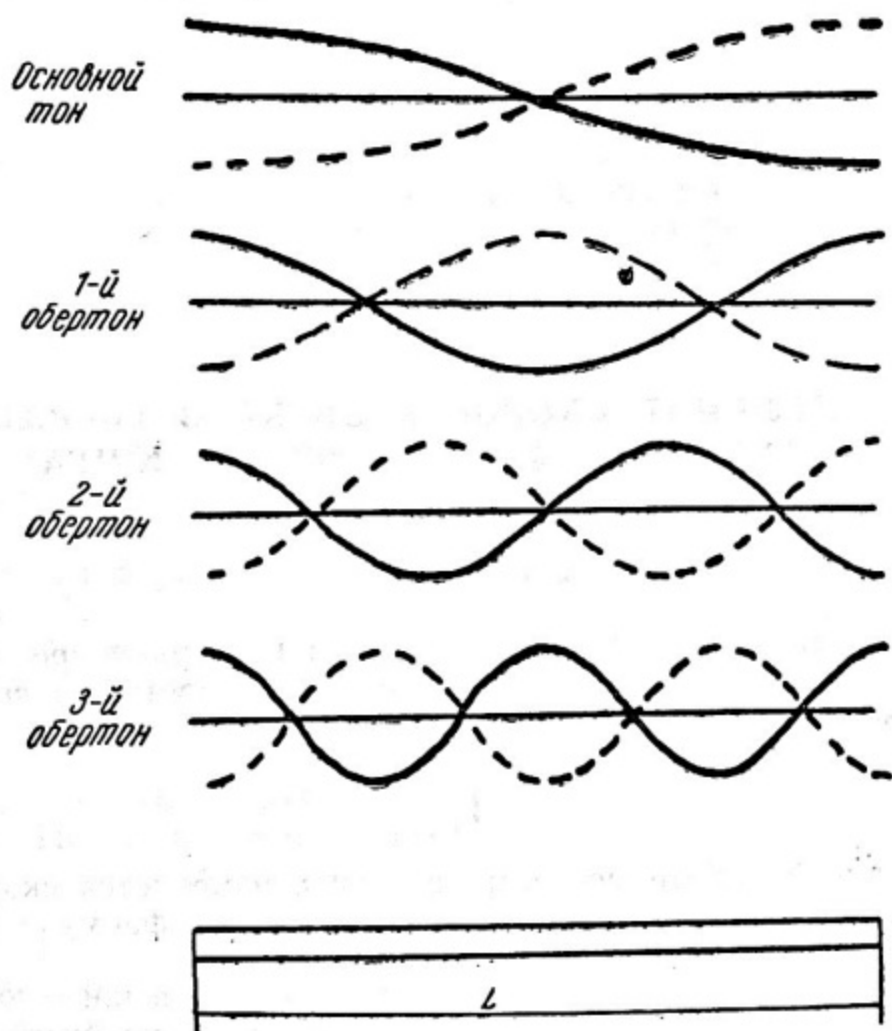


Рис. 5.1.

Из рис. 5.1 видно, что на длине стержня L укладывается при резонансе целое число полуволн, т. е.

$$L = \frac{\lambda_n}{2}(n + 1), \quad (5.2)$$

где $n=0, 1, 2$ и т. д.; λ_n — длины волн, соответствующие частотам собственных продольных колебаний стержня. Это соответствие устанавливается соотношением

$$v = \lambda \nu, \quad (5.3)$$

связывающим скорость звуковой волны с ее длиной λ и частотой ν .

Подставляя в это соотношение значение λ_n из уравнения (5.2), получаем выражение для расчета скорости звука:

$$v = \frac{2L\nu_n}{n+1}, \quad (5.4)$$

где ν_n — частота внешнего воздействия, при которой в стержне возникает резонанс.

Исследуемый стержень закрепляется посередине, что приводит к заметному ослаблению или даже исчезновению стоячих волн с пучностями смещения посередине стержня.

Резонанс в стержне отчетливо наблюдается на частотах основного тона, соответствующего $n=0$ в формуле (5.2), и четных обертонов, соответствующих $n=2, 4, \dots$ (см. рис. 5.1).

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Приборы и принадлежности: установка для измерения скорости звука в твердых телах, электронный осциллограф, звуковой генератор, набор стержней из исследуемых материалов.

Схема установки для измерения скорости звука в твердых телах изображена на рис. 5.2. Стержень Ст из исследуемого материала крепится винтами в обойме Об, которая может перемещаться по направляющим стержням держателя Д.

Генератор электрических колебаний ЗГ питает током звуковой частоты обмотки электромагнита-возбудителя ЭМ-1, расположенного в обойме у нижнего торца стержня. Оба конца стержня снабжены насадками из ферромагнитного материала*.

Попеременное притяжение нижнего торца стержня к электромагниту ЭМ-1 приводит к возникновению продольных колебаний в стержне. У верхнего торца стержня расположен электромагнит-приемник ЭМ-2, в обмотках которого при колебаниях стержня возникает э.д.с. индукции. Переменное электрическое напряжение с обмоток электромагнита ЭМ-2 подается на вертикальный вход электронного осциллографа ЭО и вызывает колебания электронного луча по вертикали. При резонансе, когда смещения торцов стержня максималь-

* Стержни из ферромагнитных материалов в подобных насадках не нуждаются.

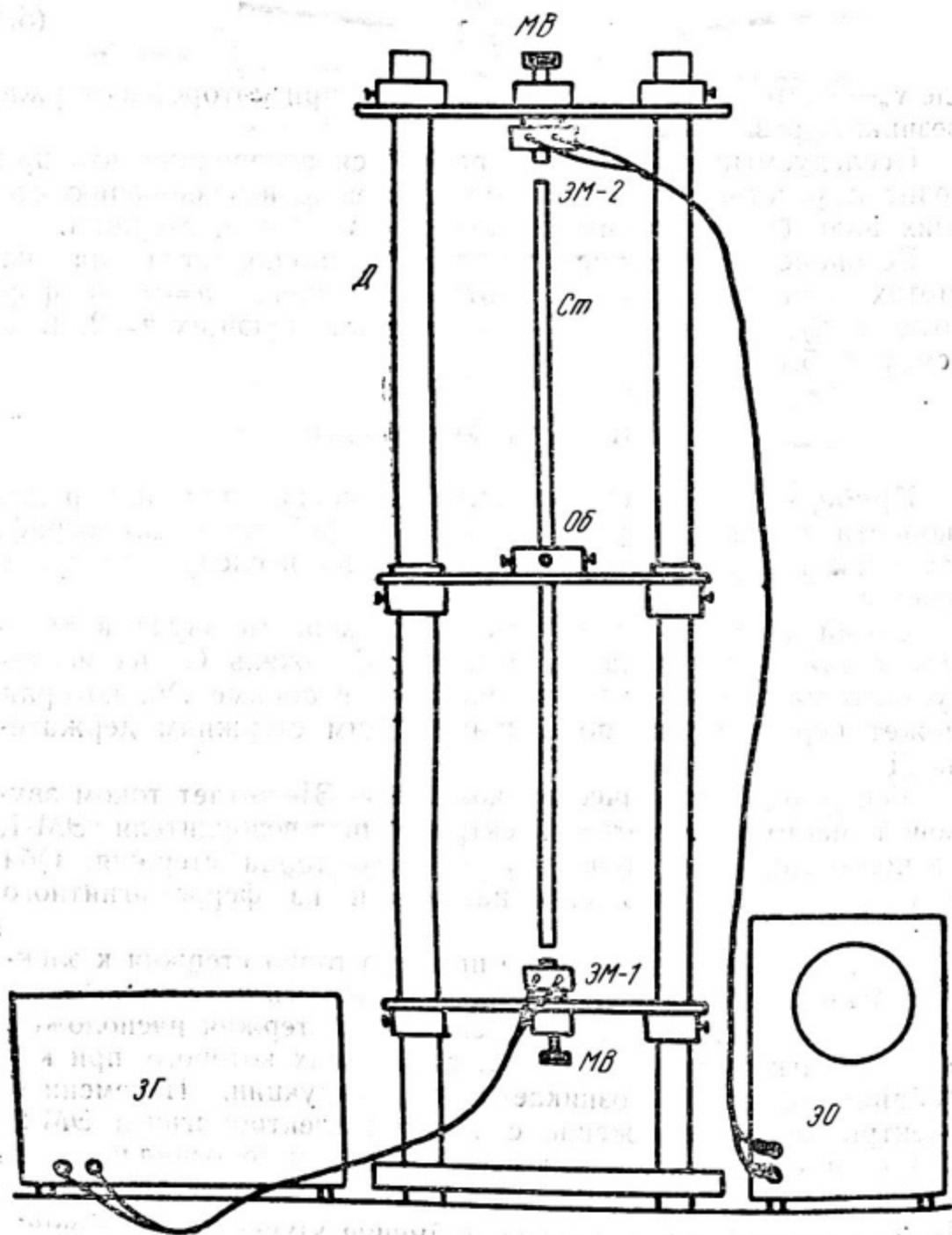


Рис. 5.2.

ны, амплитуда колебаний электронного луча достигает наибольшего значения.

В катушки обоих электромагнитов вмонтированы постоянные магниты, чем достигается равенство частот колебаний генератора ЗГ и продольных колебаний стержня (в противном случае частота колебаний стержня была бы в два раза больше частоты генератора). Верхний и нижний электромагниты, укрепленные в обоймах, снабжены микрометрическими винтами МВ, с помощью которых осуществляется их перемещение и точная установка.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Включить генератор звуковых частот и осциллограф для предварительного прогрева.

2. Измерив длину исследуемого стержня, закрепить его в обойме держателя. Отрегулировать установку электромагнитов относительно оси стержня: нецентральное положение стержня вызывает появление поперечных колебаний и возникновение ложных резонансов. Верхний и нижний электромагниты установить без касания таким образом, чтобы расстояние между их полюсами и торцами стержня было минимально возможным ($\sim 0,1$ мм). Это обеспечит большую величину вынуждающей силы и, следовательно, большую резонансную амплитуду.

3. Произвести настройку и регулировку осциллографа. Брашением ручек «Ось x » и «Ось y » привести луч в центр координатной сетки экрана. Отрегулировать яркость и фокусировку луча с помощью ручек «Яркость» и «Фокус». Переведя ручку «Ослабление» в положение 1:1, а ручку «Усиление» в среднее положение, подать напряжение на выходные клеммы звукового генератора, вращая ручку «Рег. вых. напр.» по часовой стрелке. Горизонтальную развертку луча делать не нужно.

4. Переключатель «Множитель» звукового генератора перевести в положение « $\times 100$ ». Затем, наблюдая за поведением луча на экране осциллографа, медленно вращать лимб частоты звукового генератора. Рекомендуется искать резонанс на основном тоне в следующих диапазонах частот (Гц):

Стальной стержень 4500—5500

Алюминиевый стержень 4500—5500

Латунный стержень 2500—3500

Медный стержень 3500—4500

При совпадении частоты генератора с резонансной частотой амплитуда колебаний электронного луча достигает максимума. Однако нужно помнить, что в данном случае резонанс исключительно узкий. Поэтому даже при медленном вращении лимба частоты ЗГ резонанс проходит очень быстро и резонансный режим не успевает установиться полностью. Вследствие этого увеличение амплитуды в резонансе весьма кратковременно и невелико: при не очень медленном вращении лимба частоты ЗГ резонанс воспринимается как «вздрагивание» электронного луча. «Подозрительная» на резонанс точка проходится вторично при очень медленном вращении лимба частоты.

Для более точного отсчета резонансной частоты нужно лимб генератора установить по указателю на ближнем к резонансу делении и, вращая рукоятку «Расстройка, %» в обе стороны, найти положение, соответствующее резонансу в стержне, и определить таким образом резонансную частоту основного тона. Если в резонансе луч выходит за пределы экрана, следует уменьшить напряжение на выходе ЗГ вращением ручки «Рег. вых. напр.» или же уменьшить амплитуду колебаний электронного луча ручкой «Усиление» осциллографа. Таким же способом можно добиться увеличения резонансной амплитуды.

5. Провести измерение частот обертонов стержня. При этом предварительно рассчитать их положение исходя из уже найденной частоты основного тона. Следует помнить, что колебания с пучностями в середине (т. е. колебания с $n=1, 3, 5, \dots$) отсутствуют, так как стержень закреплен посередине.

6. Рассчитать скорость звука в стержне, а по ней — модуль Юнга материала стержня. Аналогичные измерения провести для ряда исследуемых стержней. Определить ошибки измерений.

Работа 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ И ОТНОШЕНИЯ C_p/C_v МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА

ВВЕДЕНИЕ

Скорость распространения звука в газах определяется формулой

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}}, \quad (6.1)$$

где $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$; T — абсолютная температура; μ — масса моля газа; R — универсальная газовая постоянная. Таким образом, скорость звука в газе зависит от температуры и от значений величин μ и γ , характеризующих газ. Зависимость от γ определяется тем, что процесс сжатия — разрежения, протекающий в газах при распространении звука, происходит адиабатически.

Из формулы (6.1) следует:

$$\gamma = \frac{\mu v^2}{RT}. \quad (6.2)$$

Измерив при определенной температуре T скорость звука в газе с известным μ , можно по формуле (6.2) вычислить одну из важнейших термодинамических характеристик газа — величину γ .

В предлагаемой работе измеряется скорость звука в воздухе методом *стоячих* волн, образующихся в столбе газа, заключенного в трубе. Один конец трубы закрыт поршнем, у другого конца расположена мембрана динамика. При

колебаниях мембраны по трубе распространяется звуковая волна, которая интерферирует с волной, отраженной от поверхности поршня. В результате, если частота колебаний мембраны совпадает с одной из частот *собственных колебаний* воздушного столба (*явление резонанса*), в трубе устанавливаются стоячие звуковые волны.

У поверхности колеблющейся мембраны образуется пучность смещения и скорости (узел давления*) стоячей волны, у поверхности поршня, наоборот, — узел смещения и скорости (пучность давления). Одно из возможных распреде-

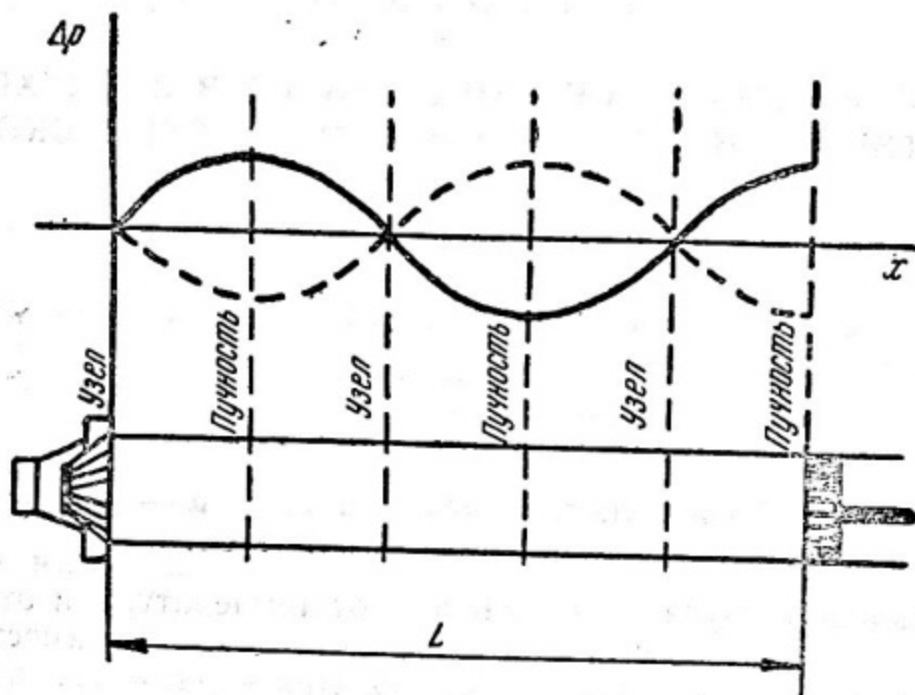


Рис. 6.1.

лений узлов и пучностей стоячей звуковой волны в трубе показано на рис. 6.1. Сплошная кривая характеризует давление Δp в момент наибольшего сжатия и разрежения газа, пунктирная — спустя полпериода колебаний.

На рис. 6.1 можно видеть, что на длине L резонирующего воздушного столба укладывается целое число полудлин и четверть длины волны, т. е. нечетное число четвертей длин волн λ_n , соответствующих частотам колебаний мембраны динамика ν_n , при которых в воздушном столбе возникает резонанс и образуются стоячие звуковые волны.

* Имеется в виду давление, избыточное над атмосферным.

Скорость звука равна

$$v = \lambda_n \nu_n. \quad (6.3)$$

Частоты $\nu_0, \nu_1, \nu_2, \dots$ и т. д. называют также частотами основного тона первого, второго и т. д. обертонов звучащей трубы. Им соответствуют длины волн $\lambda_0 = 4L, \lambda_1 = \frac{4}{3}L, \lambda_2 = \frac{4}{5}L, \dots, \lambda_n = \frac{4}{2n+1}L$, где $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

Номер обертона равен количеству полуволн, образующихся в столбе воздуха. На рис. 6.1 изображено распределение давления в трубе для второго обертона.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Приборы и принадлежности: установка для определения скорости звука в воздухе методом акустического резонанса, электронный осциллограф, звуковой генератор.

Схема установки для определения скорости звука в воздухе методом акустического резонанса изображена на

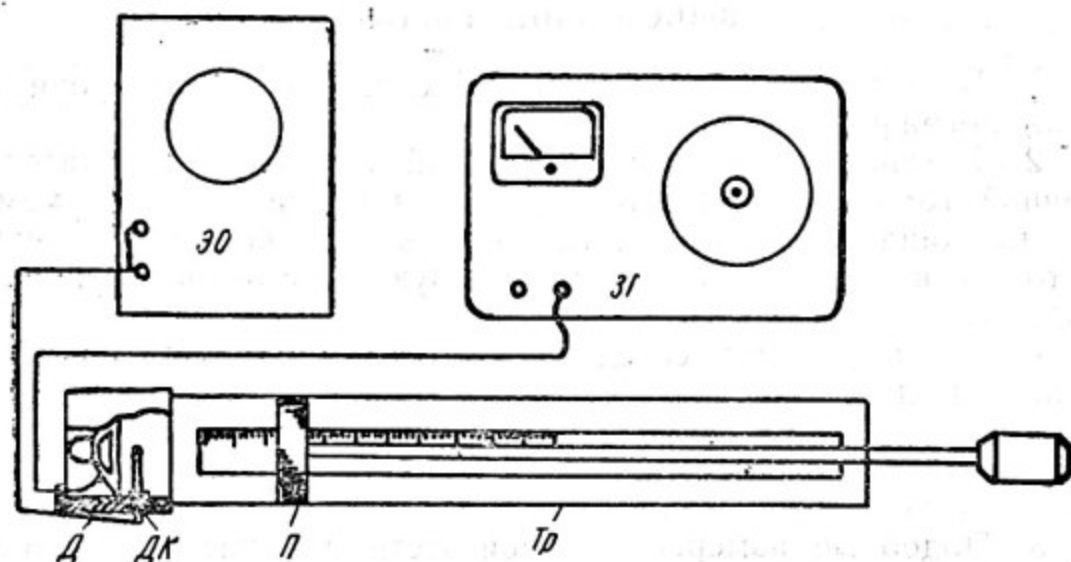


Рис. 6.2.

рис. 6.2. Металлическая труба Тр смонтирована на основании, снабженном миллиметровой шкалой, по которой отсчитывается расстояние между мембраной динамика Д и поршнем П. Поршень передвигается вдоль трубы с помощью У-образного штока Шт. Колебания воздуха в трубе возбуждаются под действием мембраны динамика, который питается от генератора электрических колебаний звуковых частот.

Вблизи динамика в трубе имеется паз с вмонтированным в него датчиком электрических колебаний ДК, главным элементом которого является пьезокристаллическая пластинка. Работа этой пластинки в качестве датчика электрических колебаний основана на использовании *пьезоэлектрического эффекта*, заключающегося в возникновении электрического поля в кристаллах при их деформациях. Таким образом, назначение пьезокристаллической пластинки состоит в преобразовании механических колебаний в электрические.

С обкладок пьезокристаллической пластинки электрическое напряжение подается на вертикальный вход электронного осциллографа ЭО. Амплитуда смещения электронного луча на экране осциллографа пропорциональна амплитуде давления стоячей звуковой волны в месте расположения пьезокристаллической пластинки и в случае резонанса достигает наибольшего значения.

Правила работы с звуковым генератором и электронным осциллографом изложены в работе 1.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Включить генератор звуковых частот и электронный осциллограф.

2. Установить частоту колебаний звукового генератора равной 10^3 гц. Перемещая поршень в направлении от мембраны динамика, произвести отсчеты его положений, при которых возникает резонанс (образуются стоячие звуковые волны).

Разность отсчетов соседних положений поршня (при резонансе) дает значение половины длины звуковой волны. Каждую настройку трубы в резонанс провести не менее трех раз, определяя положение поршня установки как среднее арифметическое из этих отсчетов.

3. Подобные измерения произвести на частотах 1200, 1400, 1600 и 1800 гц.

4. Используя соотношение (6.3), рассчитать скорость звука в воздухе и по формуле (6.2) определить отношение теплоемкостей C_p/C_v . Температуру воздуха в трубе принять равной комнатной.

5. Рассчитать скорость звука в воздухе при 0°C .

6. Оценить ошибку измерений.

Работа 7

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

ВВЕДЕНИЕ

Для измерения температуры в физических экспериментах наиболее часто используют термоэлектродвижущую силу, возникающую в цепи, содержащей два неодинаково нагретых спая различных металлических проводников и изменение с нагреванием: а) сопротивления некоторых проводников; б) объема некоторых жидкостей и в) давления (при постоянном объеме) газов.

Выбранное для измерения температуры тело (термометр) приводят в тепловое равновесие с исследуемым телом или средой, температуру которой надо определить. Предварительно термометр должен быть градуирован. Результаты градуировки наносят на график, по которому производят отсчеты температур, а также изготавливают шкалу термометра. Шкалу можно нанести непосредственно на термометр (например, ртутный) или на связанный с ним измерительный прибор (для термоэлектрического термометра или термометра сопротивления).

В системе СИ основной температурной шкалой признана шкала Кельвина, на которой интервал температур между точкой плавления льда и точкой кипения воды при нормальном атмосферном давлении равен 100° . На практике точку плавления льда принимают за условный нуль температуры (0°C). Тогда температура кипения воды равна 100°C , температура кристаллизации олова — $231,9^\circ\text{C}$, температура кипения азота — 196°C (все отнесено к нормальному атмосферному давлению).

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РТУТНЫМ ТЕРМОМЕТРОМ

Ртутный термометр — самый распространенный и достаточно точный прибор для измерения температуры в интервале от -38 до $+356^{\circ}\text{C}$, ограниченном точкой замерзания и точкой кипения ртути. Мерой температуры служит высота поднятия или опускания ртути в капилляре термометра.

Нулевое показание термометра должно точно соответствовать точке таяния льда, а сотое — точке кипения воды. Однако при серийном изготовлении ни на одном термометре такое точное соответствие не получается, поэтому для образцового термометра необходимо опытным путем определить соответствующие поправки.

Чем больше интервал температур, для измерения которых предназначен термометр, тем меньше цена деления его шкалы и ниже точность отсчета. Поэтому чувствительные ртутные термометры изготавливаются на небольшие интервалы температур, составляющие обычно 50° . Для измерения температуры в большом интервале используются наборы таких термометров, интервалы которых расположены в порядке возрастания температур.

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ

ТЕРМОМЕТРОМ (термопарой)

Главную часть термопары составляют два различных проводника, называемые термоэлектродами, концы которых сварены или спаяны. Термоэлектроды должны быть по всей длине надежно изолированы. Один спай — рабочий — помещается в среду, температура t_x которой измеряется. Другой спай — холодный — во время работы выдерживается при постоянной температуре t_0 . В цепи термопары возникает термоэлектродвижущая сила (т. э. д. с.), величина которой пропорциональна разности температур спаев:

$$\varepsilon = \alpha(t_x - t_0). \quad (7.1)$$

Коэффициент пропорциональности α зависит от химического состава термоэлектродов; при малых разностях температур его можно считать постоянным.

Сила тока в цепи термопары также пропорциональна разности температур спаев:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{\alpha}{R}(t_x - t_0), \quad (7.2)$$

где R — полное сопротивление цепи термопары. Поэтому при измерении температуры термопару можно градуировать по току или по т. э. д. с. Сила тока в цепи термопары зависит от внутреннего сопротивления спаев и от сопротивления соединительных проводов. Сопротивление R может меняться с температурой и со временем, поэтому градуировка термопары по т. э. д. с. более точна и надежна.

В данной работе используется термопара медь — константан. Медно-константановые термопары часто применяются для измерения температур в интервале от -190 до $+500^{\circ}\text{C}$. Под названием «константан» объединяют группу сплавов, содержащих 45—60% меди, 55—40% никеля и небольшое количество других примесей.

Термопара с термоэлектродами из электролитической меди и константана с содержанием 60% меди и 40% никеля называется стандартной. Т. э. д. с. стандартной термопары максимальна по сравнению с т. э. д. с. термопар с другим составом константана. Для стандартной термопары в справочниках имеются таблицы с указанием температуры рабочего спая (при температуре холодного спая 0°C) и соответствующие т. э. д. с. (см. таблицу).

Т а б л и ц а

Градуировка стандартной термопары медь — константан в интервале от -200 до $+240^{\circ}\text{C}$

Температура, $^{\circ}\text{C}$	Т. э. д. с., <i>мв</i>	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Т. э. д. с., <i>мв</i>
-200	-5,539	+40	1,610
-180	-5,204	+60	2,467
-160	-4,815	+80	3,356
-140	-4,376	+100	4,276
-120	-3,886	+120	5,225
-100	-3,349	+140	6,202
-80	-2,275	+160	7,205
-60	-2,137	+180	8,233
-40	-1,446	+200	9,285
-20	-0,752	+220	10,360
0	0,000	+240	11,455
+20	0,787		

Для измерения т. э. д. с. в настоящей работе применяется потенциометр постоянного тока типа ПП. Описание прибора и правила измерения им т. э. д. с. приведены в приложении к работе.

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ТЕРМОМЕТРОМ СОПРОТИВЛЕНИЯ — ТЕРМОРЕЗИСТОРОМ

Терморезисторами называются полупроводниковые сопротивления с отрицательным температурным коэффициентом (около 3% на градус) и большим начальным сопротивлением. В интервале $0-100^{\circ}\text{C}$ сопротивление терморезистора уменьшается с температурой почти линейно, поэтому

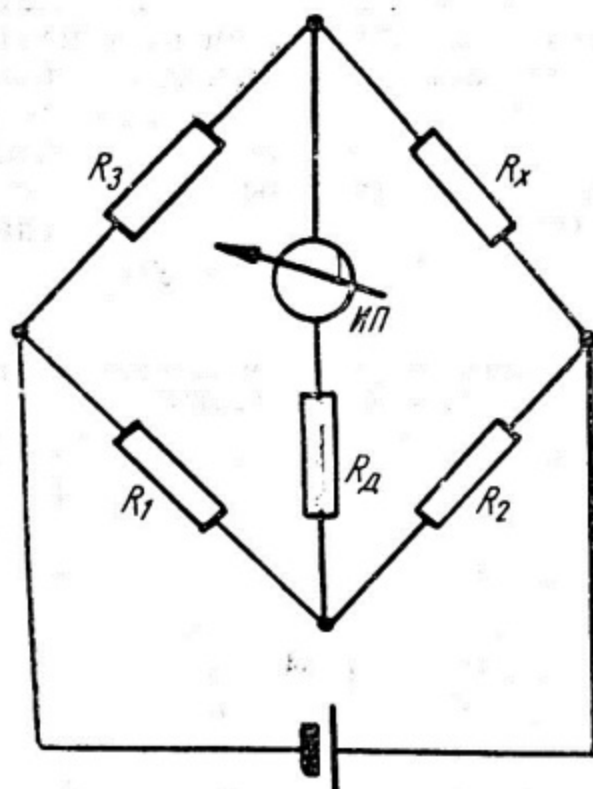


Рис. 7.1.

в этой области терморезисторы могут служить высокочувствительными приборами для измерения температур. В данной работе сопротивление терморезистора измеряется прибором, собранным по схеме моста Уитстона (рис. 7.1). В начале измерений мост сбалансирован ($R_1=R_2=R_3=R_4$) и измерительный прибор в диагонали моста указывает отсут-

вие тока (нуль шкалы прибора). При изменении сопротивления терморезистора в диагонали моста появляется ток и стрелка прибора отклоняется. Отклонение стрелки приблизительно пропорционально изменению сопротивления терморезистора. Шкала прибора может быть проградуирована непосредственно в градусах температуры.

Приборы и принадлежности: ртутный термометр, термоэлектрический термометр с потенциометром ПП, термометр сопротивления с измерительным прибором, сосуд Дьюара с тающим льдом, гипсометр, термостат, секундомер, тигель с оловом, тигель с неизвестным сплавом.

ЗАДАНИЯ

1. Проверка ртутного термометра по точкам плавления льда и кипения воды при нормальном атмосферном давлении

1. Определить нулевую точку термометра, поместив его в сосуд Дьюара, наполненный тающим льдом, изготовленным из дистиллированной воды, и произвести отсчет температуры. Измерения повторить пять раз через каждые 3 мин.

2. Определить точку кипения воды. Известно, что даже небольшие количества примесей могут существенно изменить температуру кипения воды, но почти не влияют на температуру ее пара. Кроме того, при длительном кипении может возникнуть перегрев жидкости. Поэтому термометр нельзя опускать прямо в кипящую воду, а следует поместить его в пространство, заполненное паром, что и осуществляется в приборе, называемом гипсометром (рис. 7.2).

Кипятильник 1 гипсометра наполняется дистиллированной водой, которая нагревается в нем до постоянного равномерного кипения. Пар поступает во внутренний цилиндр прибора 5, в который опускается термометр. Из цилиндра 5 пар поступает в кольцеобразное пространство между внутренним цилиндром 5 и стенками прибора 4, покрытыми тепловой изоляцией. Опустившись вниз, пар по трубе 3 поступает в холодильник 2, охлаждаемый проточной водой. Конденсат стекает в кипятильник 1. Избыток давления в приборе над атмосферным измеряется водяным манометром 6.

Когда показания термометра установятся, производят отсчет. Одновременно отмечают показания манометра 6 и барометра, находящегося в лаборатории. Измерения повторяют пять раз через каждые 3 мин.

Температура пара кипящей воды определяется с точностью до $1 \cdot 10^{-2}$ °С по формуле

$$t = 100,00 + 28,012 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) - 11,64 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2, \quad (7.3)$$

где p_0 — нормальное атмосферное давление; p — давление в гипсометре, определяемое как сумма показаний барометра и манометра.

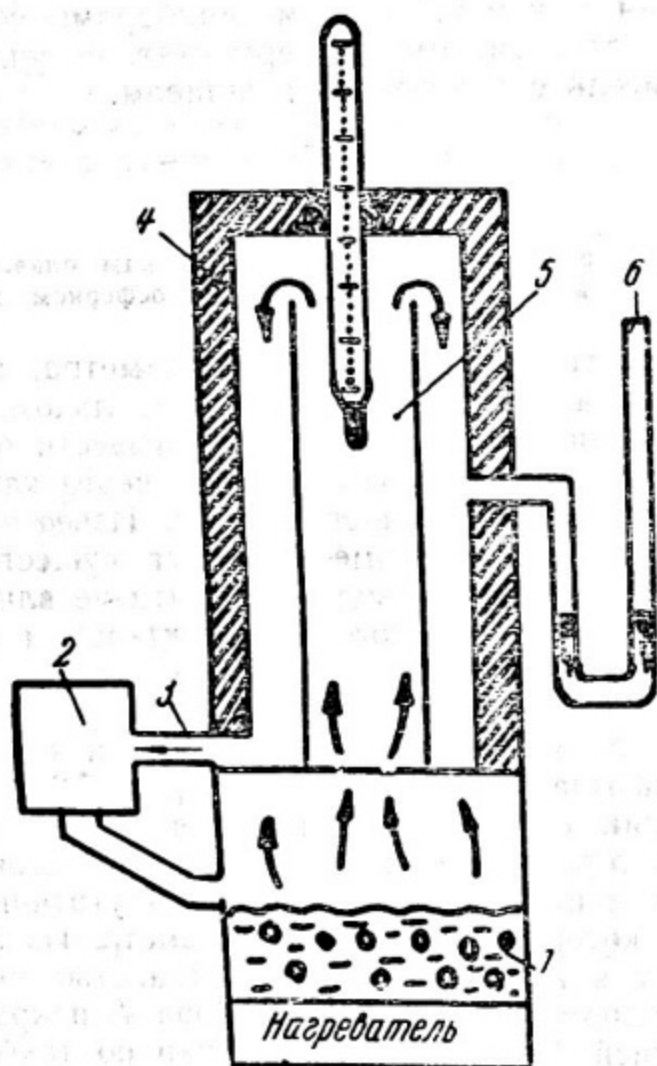


Рис. 7.2.

3. По результатам измерений, выполненных в пп. 1 и 2, определяют поправки к показаниям термометра. Если хотя бы одна из поправок окажется больше половины цены деления шкалы термометра, то строят график, по оси абсцисс ко-

торого откладывают деления шкалы термометра, а по оси ординат — поправки к показаниям термометра. Наносят на график значения поправок при 0 и 100°С. Соединяют эти точки прямой линией, которая определяет значение поправки к показаниям термометра по всей его шкале.

2. Градуировка термопары

1. Прочитать инструкцию к потенциометру ПП и изучить правила проведения измерений.

2. Подключить к потенциометру провода, идущие от термоэлектродов термопары. Сбалансировать потенциометр. Если нагревание или охлаждение одного из спаев термопары вызывает отклонение стрелки прибора, можно приступить к измерениям.

3. Определить величину т. э. д. с. термопары при различных температурах.

Опустить оба спая термопары в сосуд Дьюара с тающим льдом и убедиться, что т. э. д. с. обращается в нуль. В дальнейшем один спай термопары (рабочий) будем помещать в различные среды с постоянной температурой. Другой спай (холодный) будет постоянно находиться в сосуде Дьюара с тающим льдом.

Опустить рабочий спай термопары в сосуд Дьюара с жидким азотом. Измерять т. э. д. с. термопары пять раз через каждые 3 мин.

Опустить рабочий спай термопары в гипсометр с кипящей водой и измерить т. э. д. с. пять раз через каждые 3 мин.

Опустить рабочий спай термопары в тигель с расплавленным оловом. Включить нагревание и измерять т. э. д. с. через равные промежутки времени* до полного затвердевания олова. После отвердевания расплавить олово, медленно нагревая тигель и продолжая измерения т. э. д. с. Закончив измерения, извлечь термопару из расплава. Построить график зависимости т. э. д. с. от времени в процессе остывания и нагревания тигля. На графике должны обозначиться участки почти постоянной температуры. Каждый такой участок должен быть зафиксирован не менее чем тремя точками. Т. э. д. с., измеренные на середине этих участков, со-

* Интервал времени между измерениями следует выбрать, проделав предварительный опыт.

ответствуют температуре плавления — кристаллизации олова. Расхождения в значениях т. э. д. с., измеренных при нагревании и остывании, позволяют оценить погрешность измерения т. э. д. с. при этой температуре.

4. Сравнить значения т. э. д. с. градуируемой термопары ε_t с т. э. д. с. стандартной термопары $\varepsilon_{t \text{ ст}}$ при тех же температурах и вычислить разности:

$$\Delta_t = \varepsilon_t - \varepsilon_{t \text{ ст}}$$

Результаты всех измерений и вычислений занести в таблицу.

Температура				
Т. э. д. с. ε_t				
$\Delta_t = \varepsilon_t - \varepsilon_{t \text{ ст}}$				

5. Построить график расхождений. По оси абсцисс отложить т. э. д. с. ε_t , а по оси ординат — величину Δ_t . Нанесенные на график точки соединить отрезками прямых линий. Наличие резких изломов свидетельствует об ошибках градуировки или расчетов.

График расхождений позволяет найти поправки, которые следует алгебраически сложить с табличными значениями т. э. д. с. стандартной термопары, чтобы составить таблицу для градуируемой термопары по всему интервалу температур от -200 до $+220^\circ\text{C}$.

6. Составить таблицу зависимости т. э. д. с. ε_t от температуры и построить график этой зависимости в пределах от -200 до $+240^\circ\text{C}$ для тех же температур, какие указаны в таблице градуировки стандартной термопары.

3. Градуировка терморезистора

1. Ознакомиться с измерениями сопротивлений по методу моста Уитстона. Начертить в тетради схему моста и объяснить принцип его действия. Объяснить необходимость введения добавочного сопротивления R_d (см. рис. 7.1).

2. Подключить к измерительному прибору провода от терморезистора и включить источник питания. Стрелка прибора должна стоять на нуле. Положение стрелки регулируют ручкой «Корректор нуля». У исправного прибора нагревание или охлаждение терморезистора должно вызывать отклонение стрелки.

3. Опустить терморезистор и образцовый термометр в термостат*. Проградуировать терморезистор по образцовому термометру в интервале $50-80^{\circ}\text{C}$ через каждые 5°C . Результаты градуировки записать в таблицу.

4. Построить график градуировки терморезистора, отложив по оси абсцисс температуру, измеренную термометром, а по оси ординат соответствующие показания измерительного прибора в делениях шкалы.

4. Определение температуры плавления неизвестного сплава

Температура плавления неизвестного сплава определяется с помощью термопары или терморезистора. Горячий спай термопары или терморезистор помещают в пробирку, заполненную маслом и опущенную в тигель с неизвестным сплавом. Отмечают показания измерительного прибора при нагревании и охлаждении сплава и строят график зависимости показаний прибора от времени так же, как это делалось при определении т. э. д. с. термопары в точке плавления — кристаллизации олова.

Определив значение т. э. д. с. или показания измерительного прибора терморезистора в точке плавления — кристаллизации сплава, по соответствующему графику градуировки находят температуру плавления неизвестного сплава.

По расхождению показаний прибора при нагревании и остывании сплава оценивают ошибку измерений.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ПРАВИЛА РАБОТЫ С ПОТЕНЦИОМЕТРОМ ПП

Потенциометр постоянного тока типа ПП (рис. 7.3) предназначен для измерений э. д. с. и напряжений в пределах $0-71\text{ мВ}$. На панели прибора расположены шкала гальва-

* Описание термостата и правила работы с ним приведены на стр. 73.

ометра и ручки управления. Приступая к измерениям, следует убедиться в том, что стрелка гальванометра установлена на нулевое деление шкалы, в противном случае уста-

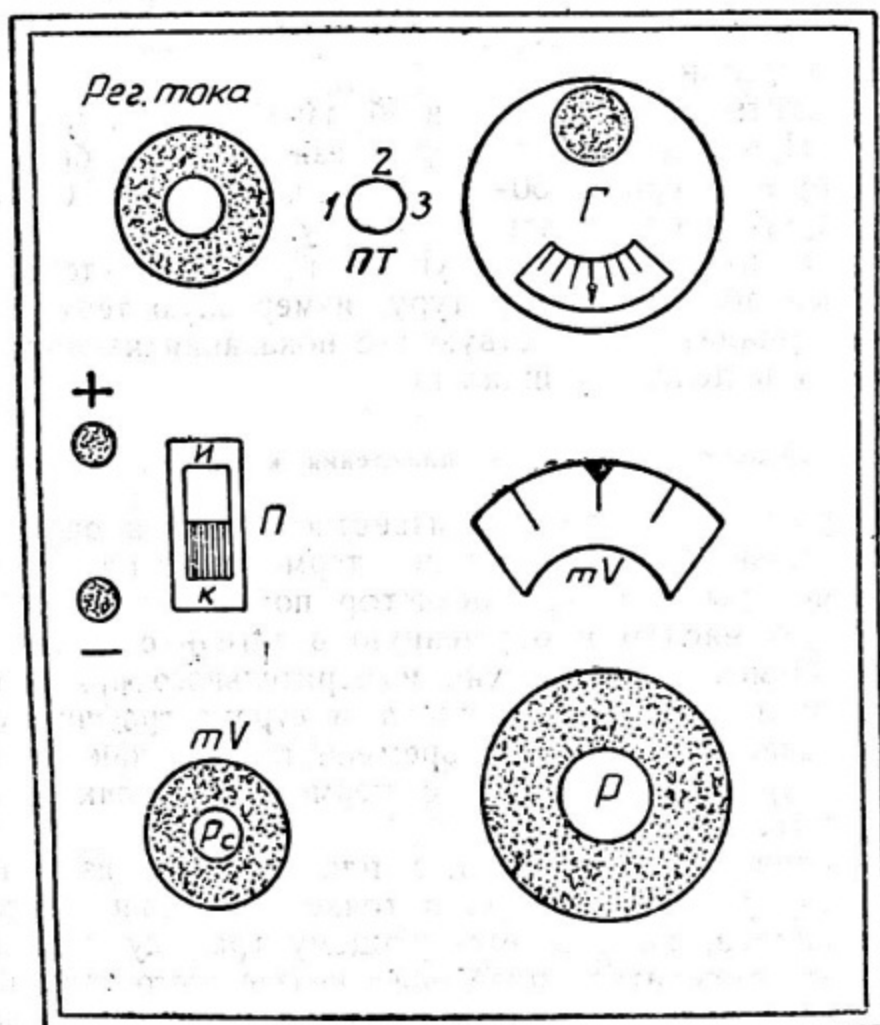


Рис. 7.3.

новить стрелку гальванометра в это положение поворотом ручки «Корректор».

Порядок измерения э. д. с. термопары:

1. Присоединить к зажимам X провода от термопары.
2. Установить переключатель П в положение К (контроль) и вращением ручки «Рег. тока» поставить стрелку гальванометра на нуль (переключатель тока ПТ устанавливается в положение 1, 2 или 3, см. рис. 7.3).
3. Перевести переключатель П в положение И (измерение). Вращением ручек секционированного регулятора P_c

(ступенчатая настройка) и регулятора Р (плавная настройка) установить стрелку гальванометра на нуль.

4. Измеряемая э. д. с. равна сумме показаний регуляторов P_c и P .

Пример. Регулятор P_c установлен в положение 10, регулятор P — в положение 9,5. Измеренная э. д. с. равна 19,5 мв.

5. Поставить переключатель П в положение К и убедиться, что стрелка гальванометра устанавливается на нуль. Если это не так, то измерение следует повторить.

6. После окончания измерений установить переключатель П в среднее положение.

(1.8)

(2.2)

Вспомогательная цепь (рис. 1.8) не содержит элементов, обладающих индуктивностью. Поэтому при изменении тока в цепи не возникает ЭДС самоиндукции, которая могла бы помешать измерению ЭДС источника.

Работа 8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА ДАВЛЕНИЯ ГАЗА С ПОМОЩЬЮ ГАЗОВОГО ТЕРМОМЕТРА

ВВЕДЕНИЕ

Согласно закону Шарля

$$p = p_0(1 + \alpha_p t), \quad (8.1)$$

где p и p_0 — давление газа при температурах t и 0°C соответственно; α_p — термический коэффициент давления газа. При небольших плотностях (т. е. когда газы ведут себя как идеальные), коэффициент α_p приблизительно одинаков для всех газов и сохраняется постоянным и равным $\frac{1}{273}$ град $^{-1}$ в довольно широком интервале температур. При больших давлениях α_p является функцией состояния, т. е. зависит от p и t .

Один из наиболее точных способов измерения среднего значения α_p для некоторого определенного интервала температур — метод газового термометра, сущность которого состоит в том, что давление газа, заключенного в некотором постоянном объеме, измеряется при двух произвольных температурах. Из соотношений, написанных по формуле (8.1) для двух различных температур, получим

$$\alpha_p = \frac{p_2 - p_1}{p_1 t_2 - p_2 t_1}. \quad (8.2)$$

Формула (8.2) не учитывает изменение объема баллона вследствие температурного расширения стекла. Поэтому, прежде чем приступить к работе, необходимо определить

точность метода и рассчитать, какую часть погрешности измерения α_p составляет погрешность, вызванная изменением объема баллона. При расчете следует воспользоваться уравнением состояния газа

$$\frac{p_1 V_1}{1 + \alpha t_1} = \frac{p_2 V_2}{1 + \alpha t_2}$$

Изменение объема баллона: $V_2 = V_1 [1 + \gamma (t_2 - t_1)]$, где $\gamma = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$ — термический коэффициент расширения стекла.

Для предварительного расчета взять $t_1 = 20^\circ \text{C}$, $t_2 = 100^\circ \text{C}$, $\Delta t = 0,5^\circ \text{C}$, $p_0 = 760 \text{ мм рт. ст.}$; p_1 и p_2 определить по формуле (8.1) при $\alpha = \frac{1}{273} \text{ град}^{-1}$; $\Delta p = 1 \text{ мм рт. ст.}$

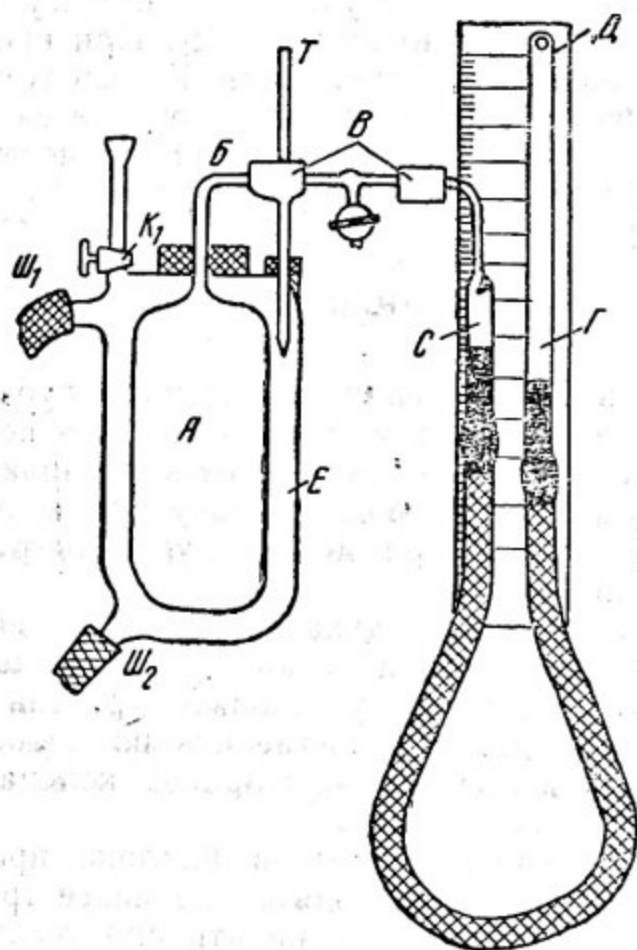


Рис. 8.1.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Приборы и принадлежности: газовый термометр, кипя- тильник, ртутный термометр, сосуд для слива воды.

Стеклянный баллон А с помощью припаянного к нему стеклянного капилляра Б и двух резиновых трубок В соединяется с левым коленом ртутного манометра Г (рис. 8.1). У самого входа в капилляр это колено снабжено изогнутым стеклянным острием С. В правом колене манометра имеется отверстие Д. Колена соединены резиновой трубкой, что позволяет перемещать правое колено вдоль вертикальной шкалы. Перемещением правого колена можно поддерживать постоянный объем воздуха в баллоне при различных температурах, что необходимо по условию опыта.

Баллон А помещен в сосуд Е, являющийся либо водяной, либо паровой рубашкой. Вода заливается в сосуд Е через воронку и вытекает из нижнего отверстия по шлангу Ш₂. Пар из кипятильника поступает по шлангу Ш₁ и вместе с конденсатом выходит по шлангу Ш₂. При пропускании через рубашку водяных паров кран К₁ следует перекрыть. Температура воздуха в баллоне определяется показаниями термометра Т, помещенного в сосуд Е. Атмосферное давление H измеряется по барометру.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Включить кипятильник. Резиновая трубка, соединяющая кипятильник с сосудом Е, должна быть перекрыта краном. Отверстие, выпускающее пар из кипятильника, *открыть*.

2. Налить холодную воду в сосуд Е и перемещением правого колена манометра довести уровень ртути в левом колене до острия С.

Когда температуры воздуха в баллоне и воды в сосуде выравняются (уровни ртути в коленах манометра перестанут перемещаться), вновь установить уровень ртути в левом колене по острию С и измерить по шкале положения уровней ртути h_0 и h_1 в левом и правом коленах манометра. Измерить температуру воды.

Установление уровня ртути в баллоне против отметки и указанные измерения проводятся не менее трех раз.

3. Слить воду из сосуда и начать пропускать через него водяные пары из кипятильника. Поддерживая уровень ртути в левом колене на острие, дожидаться, когда воздух в баллоне примет температуру водяных паров. Измерить положение h_2 уровня ртути в правом колене. Измерения произвести не менее трех раз.

4. Прекратить нагревание и тотчас же опустить трубку в положение «0», следя за тем, чтобы при охлаждении воздуха в сосуде А ртуть по капилляру Б не проникла в сосуд А.

5. Измерить атмосферное давление H .

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Давление воздуха в баллоне при температуре холодной воды t_1 равно $p_1 = H + h_1 - h_0$, при температуре водяных паров t_2 — $p_2 = H + h_2 - h_0$, где H — давление, измеренное лабораторным барометром. Подставив значения p_1 и p_2 в выражение (8.2), получим расчетную формулу для α_p

$$\alpha_p = \frac{h_2 - h_1}{(H + h_1 - h_0)t_2 - (H + h_2 - h_0)t_1} \quad (8.3)$$

В формулу (8.3) следует подставить средние значения всех измеренных величин.

2. Весь цикл измерений и вычислений повторяют не менее трех раз, после чего определяют среднее значение термического коэффициента давления воздуха

$$\alpha_{cp} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3}{3}$$

3. Вычислить $\Delta\alpha = \alpha_{cp} \left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha} \right)$, где $\frac{\Delta\alpha}{\alpha}$ — погрешность метода, определяемая перед началом работы.

4. По результатам трех циклов измерений и вычислений найти среднюю квадратичную ошибку в определении величины α_p .

5. Используя доверительный интервал погрешности метода, определить доверительную вероятность (надежность) результата определения α_p .

6. В заключении указать, каким образом можно использовать газовый термометр для измерения температуры.

Работа 9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ С ПОМОЩЬЮ ОПТИМЕТРА

ВВЕДЕНИЕ

Тепловое расширение твердых тел характеризуется термическим коэффициентом линейного расширения. При нагревании тела, имеющего первоначальную длину l , его относительное удлинение $\frac{dl}{l}$ пропорционально изменению температуры:

$$\frac{dl}{l} = \alpha \Delta t. \quad (9.1)$$

Коэффициент пропорциональности α называется истинным коэффициентом линейного расширения. При небольших изменениях температуры α практически не меняется (остается величиной постоянной), поэтому для расчетов можно пользоваться средним коэффициентом линейного расширения:

$$\alpha = \frac{l_2 - l_1}{l_1(t_2 - t_1)}, \quad (9.2)$$

где t_1 и t_2 — начальная и конечная температуры тела; l_1 и l_2 — длины тела, соответствующие этим температурам; α — термический коэффициент линейного расширения, указывающий на какую долю изменяется расстояние между двумя точками твердого тела при нагревании его на 1°C . Преобразуем выражение (9.2) к виду

$$l_2 = l_1 [1 + \alpha(t_2 - t_1)].$$

Если принять длину тела l_0 при 0°C за начальную длину, то l_t — длина тела при $t^\circ \text{C}$ равна:

$$l_t = l_0(1 + \alpha t). \quad (9.3)$$

Обычно в таблицах приводятся значения α , определенные в интервале температур $0-100^\circ \text{C}$.

Если при температуре t_1 длина тела равна l_1 , а при температуре t_2 — l_2 , то можно записать следующие соотношения:

$$l_1 = l_0(1 + \alpha t_1);$$

$$l_2 = l_0(1 + \alpha t_2),$$

используя которые, получаем выражение для α :

$$\alpha = \frac{l_2 - l_1}{l_1 t_2 - l_2 t_1}. \quad (9.4)$$

Так как для твердых тел α представляет величину порядка $10^{-5}-10^{-6} \text{ град}^{-1}$, то l_1 и l_2 исследуемого образца в небольшом интервале температур различаются долями процента (0,05—0,1) и расчетную формулу (9.4) можно представить в виде (9.2). Ошибка, получающаяся при таком определении α лежит за пределами ошибки метода данной работы.

При больших изменениях температуры или высокой точности измерений и расчетов коэффициент α нельзя считать постоянным. Он возрастает с увеличением температуры и убывает с ее уменьшением, стремясь к нулю вблизи абсолютного нуля.

Термический коэффициент линейного расширения представляет весьма важную характеристику твердого тела. Однако измерения из-за малости удлинения образцов связаны с экспериментальными трудностями. Поэтому при измерении обращаются к косвенным методам, например, таким, как емкостный, интерференционный, рентгеновский и др.

В настоящей работе применяется метод прямого (непосредственного) измерения удлинения с помощью оптиметра ИКГ — прибора высокого класса точности.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Приборы и принадлежности: исследуемый стержень, штангенциркуль, установка для измерения удлинения стержня при нагревании.

Общий вид установки приведен на рис. 9.1. Она состоит из оптиметра *III*, подогревателя *II*, в который помещен стержень *I*, и термостата *IV*, предназначенного для нагрева воды. Термостат снабжен устройством, позволяющим устанавливать и поддерживать заданную температуру. Вода поступает по соединительным шлангам в подогреватель, в результате чего стержень *I* приобретает нужную температуру и удлиняется. Измерение удлинения стержня производится оптиметром *III*, основные узлы которого показаны на рис. 9.1.

Штатив представляет собой стальной вал, на котором расположены кронштейны K_1 и K_2 . Пиноль *8* закреплена в кронштейне K_2 ; перемещение наконечника пиноли производится с помощью микрометрического винта *9*.

На предметном столике *6* с помощью струбцинок крепится подогреватель, в который вставляется исследуемый стержень. Столик можно поднять и опустить вращением маховичка с круглой ручкой, расположенного у основания оптиметра. В ручке маховичка заключен стопорный винт, с помощью которого стол может быть закреплен в нужном положении (ручка и винт на рис. 9.1 не показаны).

Для ввода исследуемого стержня на линию измерения столик перемещают в горизонтальной плоскости перпендикулярно к линии измерения. Это перемещение можно осуществить кремальерой *10*. Для совмещения линии измерения с осью оптиметра столик можно поворачивать вокруг горизонтальной и вертикальной осей. Поворот столика вокруг горизонтальной оси происходит при вращении головки *7*, в основании которой находится стопорный винт. Поворот вокруг вертикальной оси осуществляется рукояткой *5*.

Осветитель *1* жестко связан с трубкой оптиметра *4*.

Трубка оптиметра с проекционной насадкой *2* и зеркалом *3*, закреплена в кронштейне K_1 .

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ОПТИМЕТРА

Измерительная система, состоящая из измерительной головки и автоколлимационной системы, помещается внутри трубки оптиметра (рис. 9.2). Выступающий наружу наконечник измерительного штифта *5* касается торца измеряемого стержня. Другой конец штифта упирается в измерительное зеркало *4*. При удлинении стержня штифт пере-

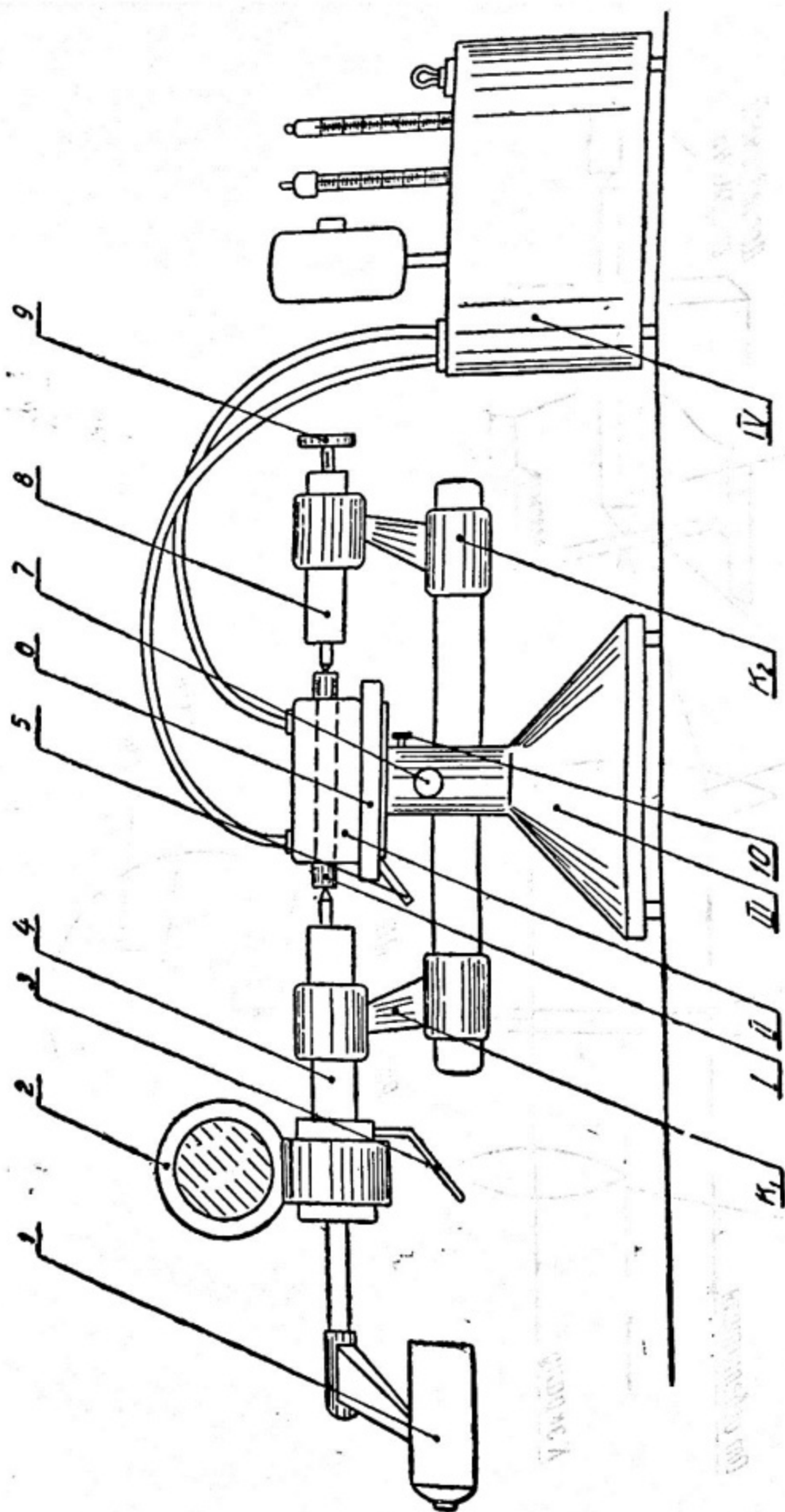
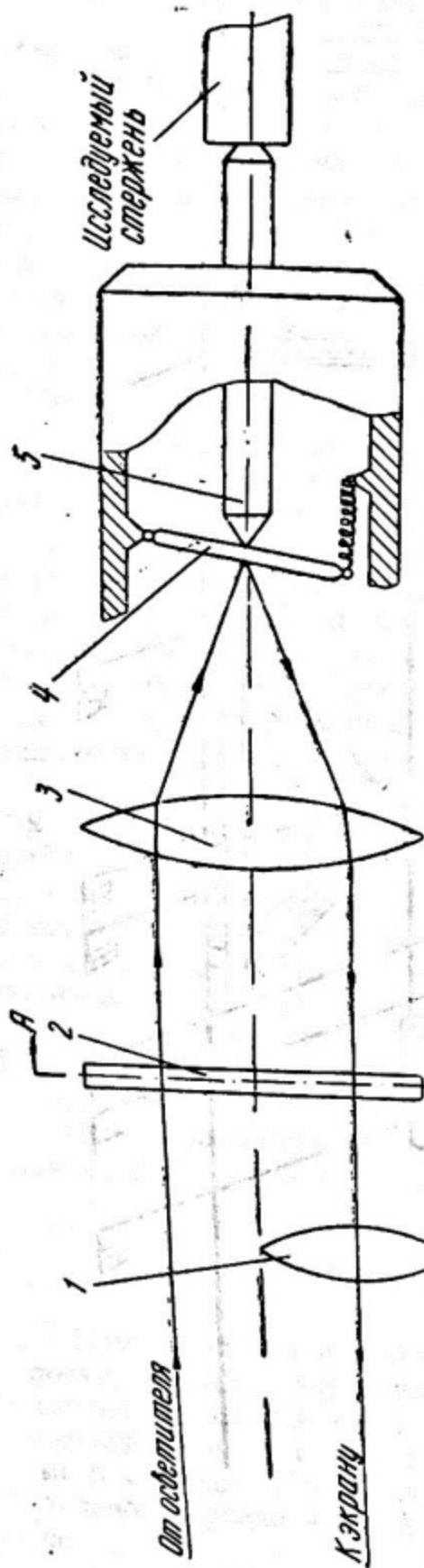


Рис. 9.1.



Разрез по AA

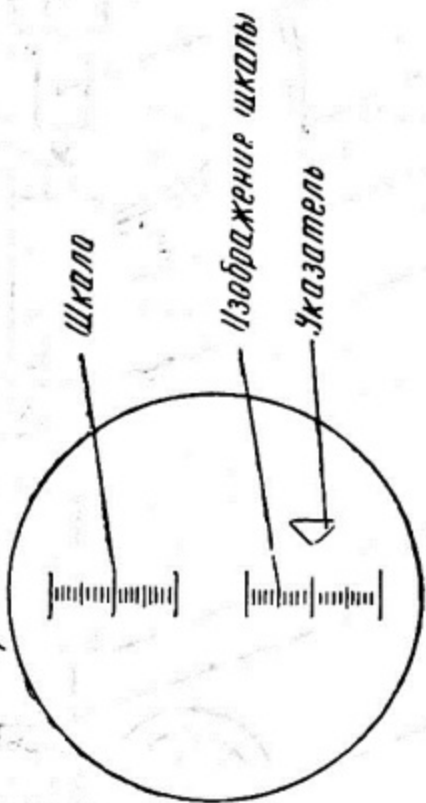


Рис. 9.2.

мещается и зеркало поворачивается на некоторый угол, что и используется для измерения удлинения стержня.

Рассмотрим оптическую схему прибора. Свет от осветителя падает на стеклянную пластинку 2, на которую в виде треугольника нанесены шкала и указатель (см. разрез по АА). Проходя через объектив 3 и отражаясь от измерительного зеркала, свет создает на нижней половине стеклянной пластинки изображение шкалы. Поворот зеркала вызывает перемещение изображения шкалы относительно указателя. Это перемещение непосредственно измеряется наблюдателем. Изображение шкалы через окуляр проектируется на матовый экран проекционной насадки. Резкость изображения регулируется вращением окуляра. Заметим, что проекционная насадка — съемная, поэтому, сняв ее, отсчет перемещения можно вести непосредственно через окуляр 1.

Цена деления оптиметра равна 1 мк. Погрешность показаний прибора составляет $\pm 0,2$ мк в интервале от 0 до 60 делений шкалы и $\pm 0,3$ мк в интервале от 60 до 100 делений.

ТЕРМОСТАТ

Термостат изображен на рис. 9.3. Он состоит из помещенного в кожаную бачку, наполненную водой, термометра ОТ. Нагрев воды в бачке осуществляется двумя электронагревателями на 700 и 300 вт (на рис. 9.3 изображен лишь один из них — Н₂). Нагреватель Н₂ служит только для форсирования нагрева и выключается, когда получена требуемая температура. В этой работе будем пользоваться нагревателем на 700 вт, который включается тумблером Т₂.

Электродвигатель Э приводит во вращение пропеллерную мешалку Мш и насос Нс. С помощью насоса вода из бачки через шланги подается в подогреватель II с исследуемым стержнем. Электродвигатель включается тумблером Т₁ с последующим нажатием пусковой кнопки ПК.

Контактный термометр КТ управляет работой электромагнитного реле, замыкающего и размыкающего цепь питания электронагревателя.

Неоновая лампочка НЛ сигнализирует о работе электронагревателя: при нагреве воды она горит, после достижения установленной (по контактному термометру) температуры гаснет.

Устройство контактного термометра изображено на рис. 9.4. Вращая головку регулировочного магнита 1, приводят во вращение магнитик 7, жестко связанный со стержнем 6.

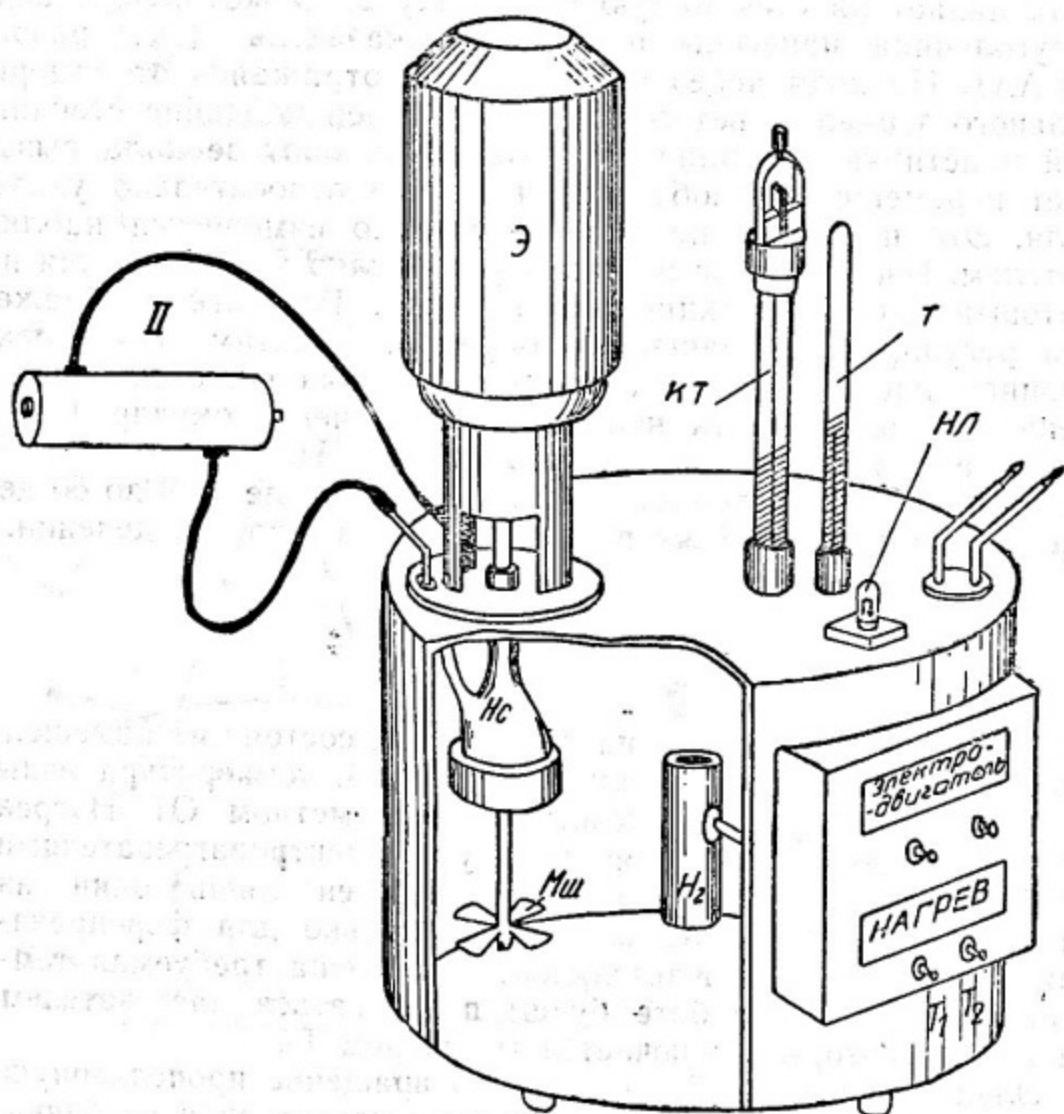


Рис. 9.3.

нем 6. Вращение стержня 6 вызывает поступательное движение каретки 5 и скрепленной с нею платиновой проволочки 3, опущенной в капилляр 4.

Пользуясь шкалами 2, устанавливают каретку и острие платиновой проволочки против соответствующего деления. По мере нагревания воды ртуть в капилляре поднимается и, достигнув заданной температуры, соприкасается с платино-

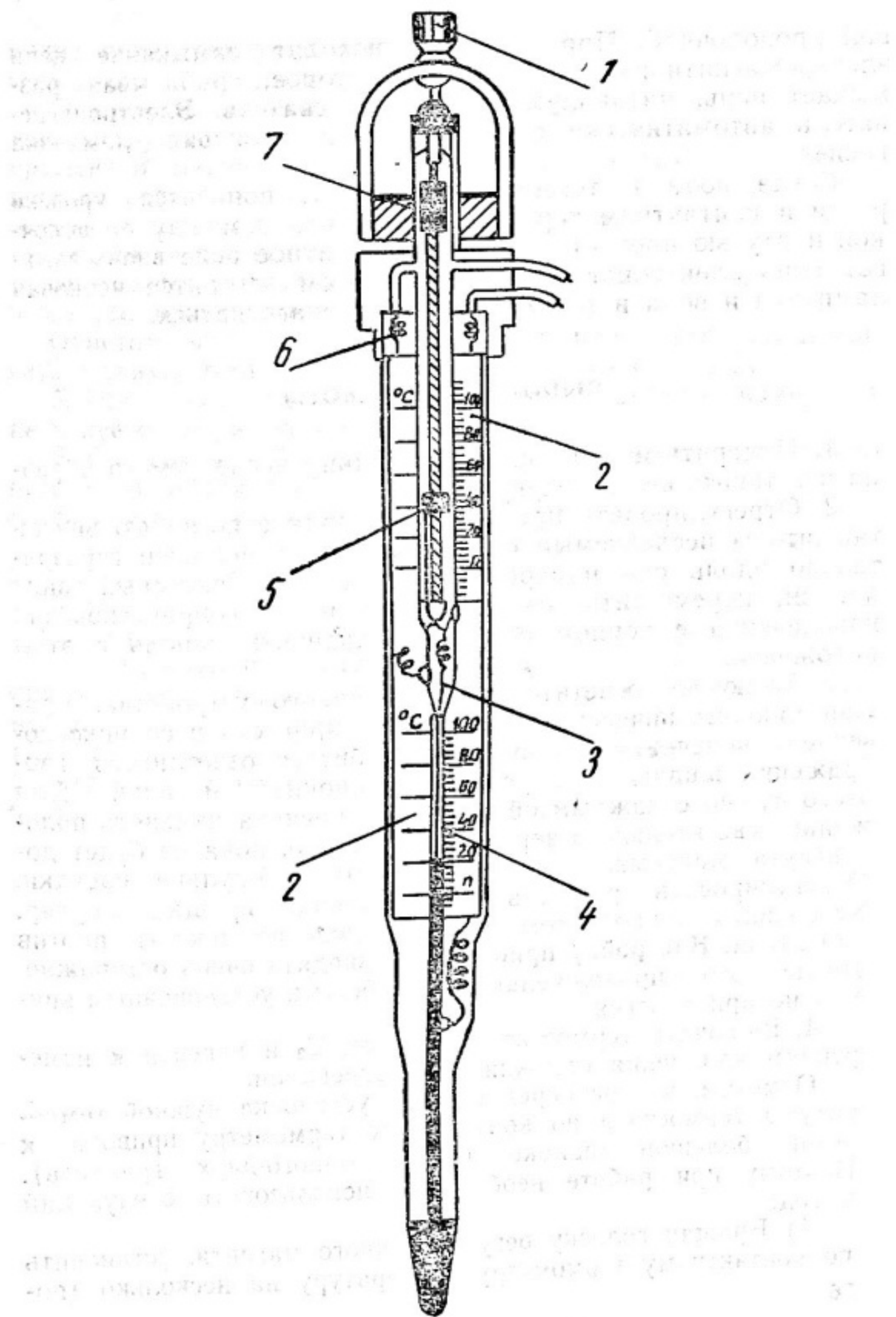


Рис. 9.4.

вой проволочкой. При этом происходит замыкание цепи электромагнитного реле (ЭМР), которое, срабатывая, замыкает цепь, питающую электронагреватель. Электронагреватель автоматически отключается, и неоновая лампочка гаснет.

Когда вода в термостате остынет, понизится уровень ртути в контактном термометре и контакт между проволочкой и ртутью прервется. Электромагнитное реле вновь замкнет цепь электронагревателя, при этом загорится неоновая лампочка и вода в термостате начнет нагреваться.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Измерить штангенциркулем длину исследуемого образца и вставить его в подогреватель.

2. Отрегулировать предметный столик с помощью винтов так, чтобы исследуемый стержень был расположен горизонтально вдоль оси измерения. Освободив зажимный винт пиноли, переместить ее влево почти до соприкосновения наконечника с торцом стержня. Закрепить пиноль в этом положении.

3. Включить осветитель проекционного устройства. Вращая микрометрический винт пиноли, привести в соприкосновение наконечники с образцом. Добиться отчетливого изображения шкалы на экране проекционной насадки. Для этого нужно с каждым оборотом микровинта изменять положение осветительного зеркала до тех пор, пока не будет достигнута максимальная освещенность в окуляре насадки. Отрегулировать резкость изображения, вращая окуляр. Установить микровинтом нулевое деление шкалы против указателя. **Настройку прибора производить очень осторожно.** После этого в продолжении всей работы к установочным винтам не прикасаться.

4. Включить термостат тумблером T_2 и перейти к измерениям удлинения стержня при нагревании.

Отметим, что непосредственная установка нужной температуры термостата по контактному термометру приводит к очень большой ошибке (около одного-двух градусов). Поэтому при работе необходимо использовать следующий метод:

1) Вращая головку регулировочного магнита, установить по контактному термометру температуру на несколько (по-

рядка пяти) градусов выше желаемой. При этом нагреватель работает и неоновая лампочка горит.

2) Следить за повышением температуры по отсчетному термометру. Когда до нужной температуры останется $0,5^\circ$, вращением магнита (против часовой стрелки) разомкнуть цепь нагревателя (при этом НЛ гаснет) и тут же вновь замкнуть ее, вращая головку магнита по часовой стрелке вплоть до загорания лампочки и не более.

3) Выждав несколько (3—5) минут до стабильности температуры, произвести отсчет.

Отметим, что предлагаемый метод позволяет устанавливать нужную температуру с точностью до $0,1-0,2^\circ$.

5. Продолжая нагрев, производить подобные измерения не менее семи раз через каждые 5° .

6. Составить таблицу для расчета коэффициента линейного расширения по методу наименьших квадратов и занести в нее полученные результаты.

7. По полученным результатам построить график зависимости удлинения стержня от температуры.

8. Подсчитать величину термического коэффициента линейного расширения по методу наименьших квадратов.

9. Составить формулу для определения ошибки измерения коэффициента линейного расширения с учетом погрешностей отдельных измерений и по ней определить доверительный интервал. Зная доверительный интервал, найти доверительную вероятность (надежность) определения величины коэффициента линейного расширения.

Работа 10

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ C_p/C_v ДЛЯ ВОЗДУХА МЕТОДОМ КЛЕМАНА — ДЕЗОРМА

ВВЕДЕНИЕ

Теплоемкостью какого-либо тела C_T называется величина, численно равная количеству тепла, которое нужно сообщить телу, чтобы повысить его температуру на один градус:

$$C_T = \frac{dQ}{dT}.$$

Теплоемкость единицы массы вещества называется удельной теплоемкостью и обозначается c . Теплоемкость моля вещества называется молярной теплоемкостью и обозначается C .

Очевидно, что

$$C = \mu c.$$

Величина теплоемкости зависит от условий, при которых происходит нагревание тела. Представляет интерес теплоемкость для случаев, когда нагревание происходит при постоянном объеме C_v или при постоянном давлении C_p . Если нагревать тело при постоянном объеме, то все тепло, сообщаемое телу извне, полностью идет на увеличение внутренней энергии. Если нагревать тело при постоянном давлении, то оно расширяется; сообщенное тепло идет не только на увеличение внутренней энергии, но и на работу изобарического расширения. Поэтому теплоемкость при постоянном давлении должна быть больше, чем теплоемкость при постоянном объеме. Особенно эти теплоемкости различаются у газов вследствие относительно большого коэффициента объемного расширения.

Для идеального газа справедливо следующее соотношение значений молярных теплоемкостей C_p и C_v :

$$C_p = C_v + R,$$

где R — универсальная газовая постоянная, равная приблизительно $2 \text{ кал/моль} \cdot \text{град}$.

Отношение теплоемкостей $\gamma = C_p/C_v$ принадлежит к числу весьма важных термодинамических величин, для его определения предложено много методов. Один из них — метод акустического резонанса — рассмотрен в работе 6.

В настоящей работе определение γ производится одним из классических методов, основанных на исследовании некоторой массы газа, последовательно проходящего через три состояния. Из первого во второе состояние газ переходит путем адиабатического расширения, из второго в третье состояние — изохорически, причем конечная температура газа в изохорическом процессе выравнивается с начальной температурой газа — температурой лаборатории.

Рассмотрим этот процесс подробнее. Баллон объемом V_0 , в котором находится сжатый воздух при комнатной температуре, с помощью крана на короткое время соединяют с атмосферой. Таким образом воздуху баллона дают достаточно быстро, а следовательно, адиабатически расширяться до выравнивания давления в баллоне с атмосферным. Далее будем рассматривать ту массу воздуха, которая осталась в баллоне после того, как кран был перекрыт. До открытия крана эта масса воздуха занимала некоторый объем $V < V_0$.

Процесс адиабатического расширения этой массы газа может быть изображен кривой 1—2 (рис. 10.1). Точка 1 соответствует начальному состоянию газа, оставшегося в баллоне, характеризуемому давлением $p_0 = p_{\text{ат}} + h$, объемом $V_0 < V_0$ и температурой (комнатной) T_0 . Состояние, изображенное точкой 2, характеризуется давлением $p_{\text{ат}}$, объемом V_0 и температурой T , меньшей T_0 .

После перекрытия крана оставшийся в баллоне газ изохорически приходит в тепловое равновесие с окружающей средой, принимая снова комнатную температуру T_0 , при этом давление повышается до значения p , удовлетворяющего условию $p_{\text{ат}} < p < p_0$. Процесс нагревания газа изображен на рис. 10.1 изохорой 2—3, причем точки 3 и 1 будут расположены на одной изотерме 1—3, соответствующей комнатной температуре T_0 и изображенной пунктиром. Конечное состояние газа соответствует давлению $p = p_{\text{ат}} + h$, объему баллона V_0 , температуре T_0 .

Учитывая, что состояния 1 и 3 характеризуются одной и той же температурой, можно применить к ним закон Бойля — Мариотта:

$$p_0 V_0 = p V_6. \quad (10.1)$$

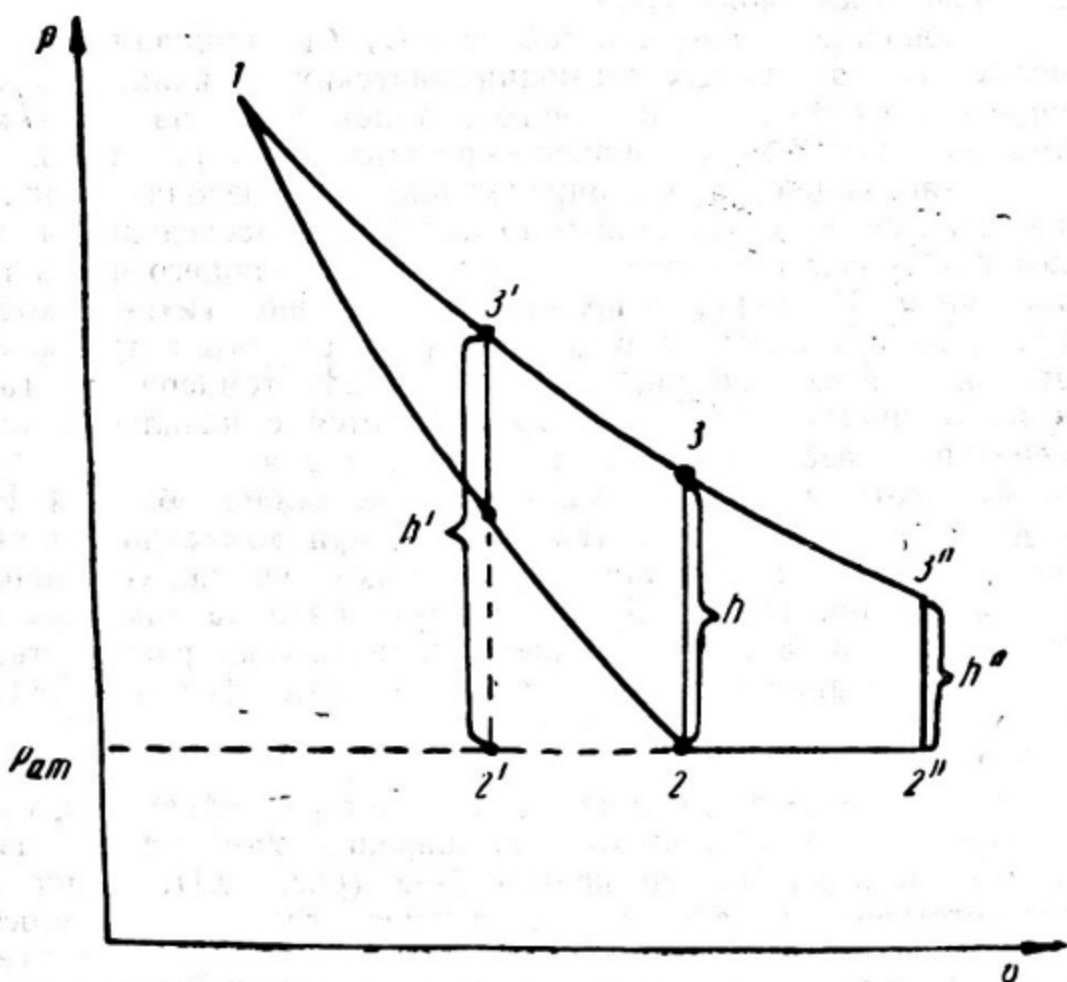


Рис. 10.1.

Для адиабатического перехода из состояния 1 в состояние 2 справедливо уравнение Пуассона:

$$p_0 V_0^\gamma = p_{ат} V_6^\gamma. \quad (10.2)$$

Из уравнений (10.1) и (10.2) можно определить γ . Для этого возведем уравнение (10.1) в степень γ и разделим его на уравнение (10.2)

$$\frac{p_0^\gamma V_0^\gamma}{p_0 V_0} = \frac{p_{ат}^\gamma V_6^\gamma}{p_{ат} V_6} \quad \text{или} \quad \left(\frac{p_0}{p} \right)^\gamma = \frac{p_0}{p_{ат}}.$$

И наконец, логарифмируя, находим

$$\gamma = \frac{\ln p_0 - \ln p_{ат}}{\ln p_0 - \ln p} = \frac{\ln (p_{ат} + H) - \ln p_{ат}}{\ln (p_{ат} + H) - \ln (p_{ат} + h)}$$

Если значения H и h значительно меньше $p_{ат}$, то

$$\ln (p_{ат} + H) \approx \ln p_{ат} + \frac{H}{p_{ат}}^*$$

и

$$\ln (p_{ат} + h) \approx \ln p_{ат} + \frac{h}{p_{ат}}$$

В этом случае можно принять

$$\gamma = \frac{H}{H-h} \quad (10.3)$$

Величина h изображится на рис. 9.1 отрезком 2—3.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Приборы и принадлежности: установка для определения отношения теплоемкостей, секундомер.

Установка для определения отношения C_p/C_v изображена на рис. 10.2. Стекланный баллон Б при закрытом выпускном кране К и открытом кране K_1 накачивают воздухом с помощью насоса Н до давления, несколько превышающего атмосферное. После этого кран K_1 закрывают и дают возможность воздуху в баллоне принять температуру окружающей среды (при накачивании температура газа повышается). При охлаждении давление в баллоне несколько уменьшится и через некоторое время установится равновесное состояние (см. рис. 10.1, состояние 1). Затем открывают на несколько секунд кран К. Благодаря достаточно большому сечению крана давление в баллоне быстро падает до атмосферного, температура понижается и газ адиабатически переходит в состояние 2. Далее газ изохорически нагревается до комнатной температуры и приходит в состояние 3. Однако практически невозможно осуществить совпадение момента перекрытия баллона с окончанием процесса адиабатического расширения. Если кран К закрыть раньше, чем давление упадет до атмосферного, то получим завышенное значение h' , соответствующее отрезку 2'—3' (см. рис. 10.1). Наоборот, при

* В этом легко убедиться, используя приближенную формулу $\ln(1+x) \approx x$, которая выполняется для $x \ll 1$.

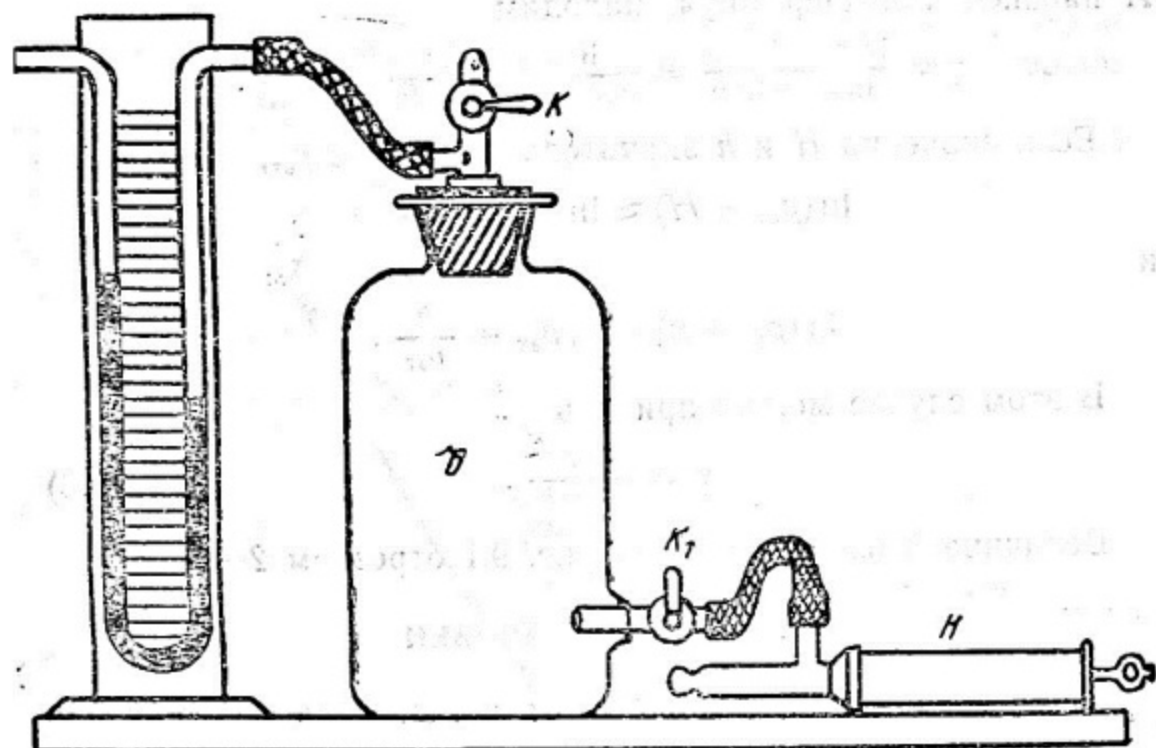


Рис. 10.2.

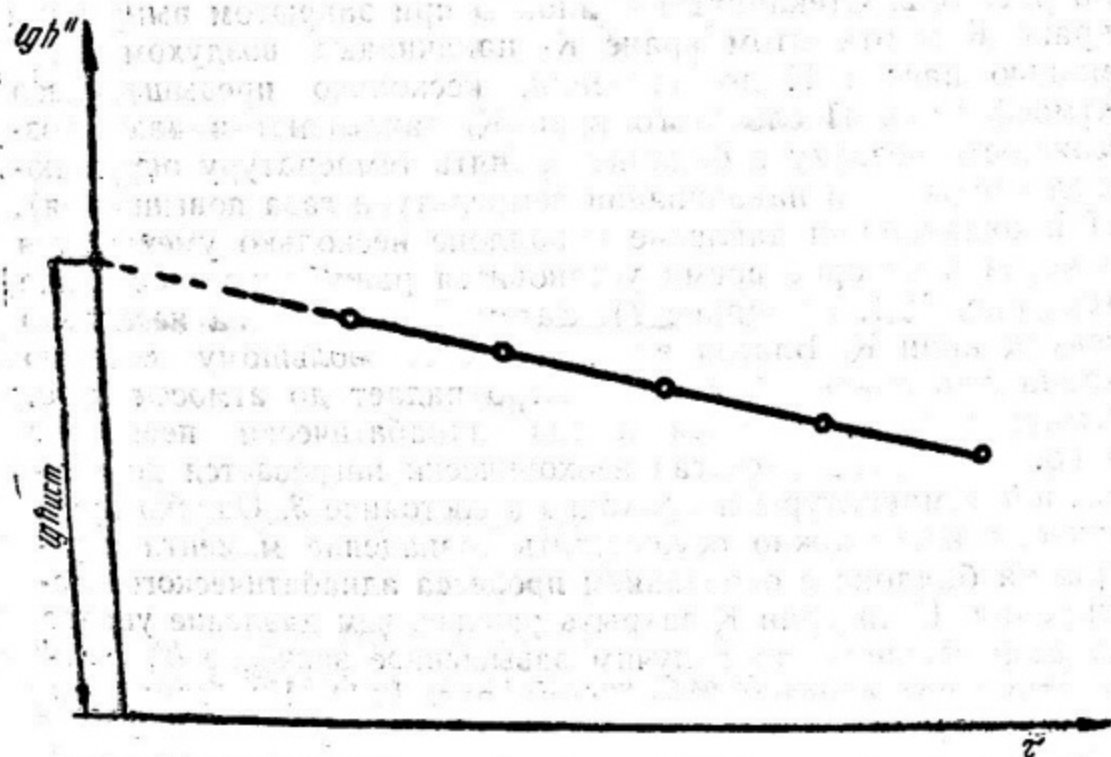


Рис. 10.3.

запаздывании получается заниженное значение h'' , соответствующее отрезку $2'' - 3''$ и тем сильнее отличающееся от h ; чем больше время запаздывания τ . Как показывает опыт, между h'' , h и τ выполняется соотношение

$$\lg h'' = \lg h - A\tau,$$

где A — константа.

На рис. 10.3 представлен график зависимости $\lg h''$ от τ , из которого видно, что, повторив опыт несколько раз с различными временами запаздывания и построив график зависимости $\lg h''$ от τ , можно путем экстраполяции найти $\lg h$ и, следовательно, h . Правда, время запаздывания неизвестно. Можно измерить лишь время, в течение которого был открыт кран; оно складывается из времен τ_0 и τ , где τ_0 — время протекания адиабатического процесса (см. участок 1—2 на рис. 10.1). Однако это не будет представлять затруднения, если времена открытия крана значительно превышают время τ_0 . Тогда время запаздывания τ можно с достаточной точностью считать равным полному времени открытия крана.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Воздух в баллон накачивают до тех пор, пока разность уровней в манометре не достигнет 205—250 мм вод. ст.

2. Закрыв кран K_1 , выжидают, когда уровни воды в манометре перестанут меняться (время установления равно 3—4 мин), и делают отсчет разности уровней H .

3. Быстро открывают кран K , одновременно включая секундомер. Держат кран открытым в течение 5 сек и затем быстро перекрывают.

4. После перекрытия крана давление в баллоне начинает расти. Выждав, когда давление перестанет меняться, делают отсчет разности уровней h'' .

5. Повторяют опыт при различных временах запаздывания не менее шести раз. При этом максимальное время запаздывания $\tau_{\text{макс}}$ должно быть выбрано так, чтобы соответствующая ему разность уровней h'' была значительно больше ошибки манометра ΔH .

Необходимо следить за тем, чтобы начальное давление в баллоне B перед открытием крана K в каждом опыте было одно и то же, т. е. $H = \text{const}$. Нужное давление устанавливается осторожным перекрытием крана K_1 . Результаты измерений заносятся в таблицу.

$H = \dots \text{ мм}$

$\tau, \text{ сек}$	$\tau_1=5$	$\tau_2=$	$\tau_3=$	$\tau_4=$	$\tau_5=$	$\tau_6=\tau_{\text{макс}}=\dots$
$h'', \text{ мм}$						
$\lg h''$						

6. Строят график $\lg h'' = f(\tau)$ *. Каждая из найденных точек должна находиться на графике в центре прямоугольника или креста, размеры которого определяются приборными ошибками. По графику определяют $h''_{\text{ист}}$ и приближенным методом оценивают Δh .

7. Рассчитывают величину γ по формуле (10.3).

8. Рассчитывают абсолютную и относительную ошибки определения γ , считая ΔH равной погрешности манометра и пользуясь величиной Δh из п. 6.

Проделяют три серии таких опытов при разных значениях H .

* Для графика желательно использовать миллиметровую бумагу с полулогарифмическим масштабом.

Работа 11

ИЗУЧЕНИЕ БРОУНОВСКОГО ДВИЖЕНИЯ ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ

ВВЕДЕНИЕ

Взвешенная в жидкости частица испытывает со стороны окружающих молекул среды непрерывные удары, причем число этих ударов в каждый данный момент неодинаково с разных сторон, что и вызывает беспорядочное движение взвешенной частицы. Это явление было впервые обнаружено Броуном в 1827 г.

Теория явления, разработанная впоследствии в исследованиях А. Эйнштейна, М. Смолуховского и Т. Перрена, показывает, что броуновское движение непосредственно связано с хаотическим тепловым движением молекул среды, в которой взвешена частица. Эйнштейн и Смолуховский провели соответствующие статистические расчеты и обнаружили закон броуновского движения, согласно которому среднее от квадратов проекций перемещений частицы на какое-либо направление, происходящих за одинаковые промежутки времени, пропорционально величине последних:

$$\overline{x^2} = \frac{RT}{3\pi\eta r N} t, \quad (11.1)$$

где R — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура; η — коэффициент вязкости среды; r — радиус частицы, которая предполагается сферической; N — число Авогадро.

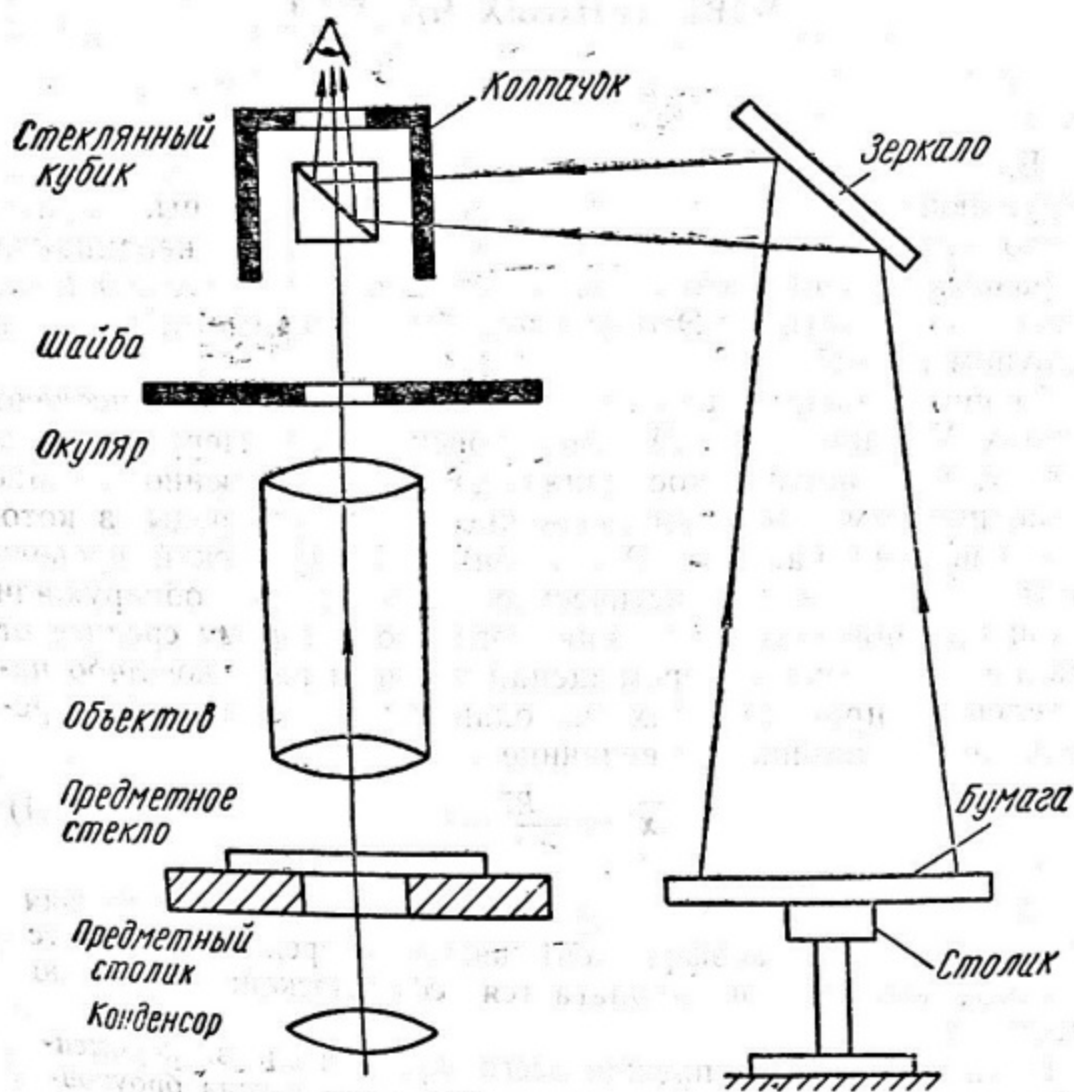
В данной работе прежде всего проводится экспериментальная проверка сформулированного выше закона броунов-

ского движения. Формула (11.1), кроме того, дает возможность определить размеры частиц, если известно число Авогадро или, наоборот, найти число Авогадро, если известны размеры частиц.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Приборы и принадлежности: микроскоп МБИ-3 с рисовальным аппаратом и осветителем, рисовальный столик, сосуд с суспензией туши, кисточка, предметное стекло.

В работе используется обычный микроскоп с достаточно большим увеличением (порядка 900). Для непосредственной зарисовки на бумаге траекторий частиц, наблюдаемых в поле



зрения микроскопа, служит рисовальный аппарат, смонтированный в виде отдельной насадки на тубусе микроскопа. Его принцип действия поясняет рис. 11.1.

Стекланный куб посеребрен в диагональном сечении, за исключением центральной части, через которую в глаз попадают лучи из микроскопа. Одновременно с частицами, находящимися в поле зрения микроскопа, с помощью зеркала можно наблюдать изображение листа бумаги.

Для нормальной работы необходимо, чтобы оба изображения имели одинаковую яркость. Этого можно добиться, меняя положение конденсора или накал лампы осветителя. Для этой же цели предназначено специальное приспособление на рисовальном аппарате в виде колпачка, на боковых стенках которого расположены отверстия с набором дымчатых стекол, — поворотом колпачка можно регулировать яркость изображения бумаги — и шайба с такими же стеклами, поворотом которой можно менять яркость изображения, даваемого микроскопом.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с устройством и назначением всех частей приборов.

2. Проверить, чтобы тубус микроскопа был выдвинут до деления с отметкой 200, так как только при этом положении тубуса увеличение микроскопа равно произведению увеличений, указанных на объективе и окуляре (900).

3. Нанести каплю суспензии на предметное стекло. Диаметр капли около 10 мм.

4. Включив осветитель и отбросив головку рисовального аппарата, осторожно опустить тубус микроскопа до соприкосновения с жидкостью*. Медленно поднимая тубус вверх, добиться четкого изображения частиц суспензии в поле зрения микроскопа.

5. Ввести рисовальный аппарат и укрепить на рисовальном столике лист белой бумаги**. Добиться одинаковой яркости как изображения частиц в поле зрения микроскопа,

* Не допускать соприкосновения с предметным стеклом, так как это может вызвать повреждение объектива.

** Применять линованную бумагу нецелесообразно ввиду того, что положение оси, на которую придется проектировать перемещение частицы, определяется формой ее траектории, а готовая координатная сетка мешает вести отсчеты.

так и изображения бумаги с острием карандаша, регулируя освещенность препарата перемещением конденсора винтом 2 (рис. 11.2). Накал лампы сделать максимальным.

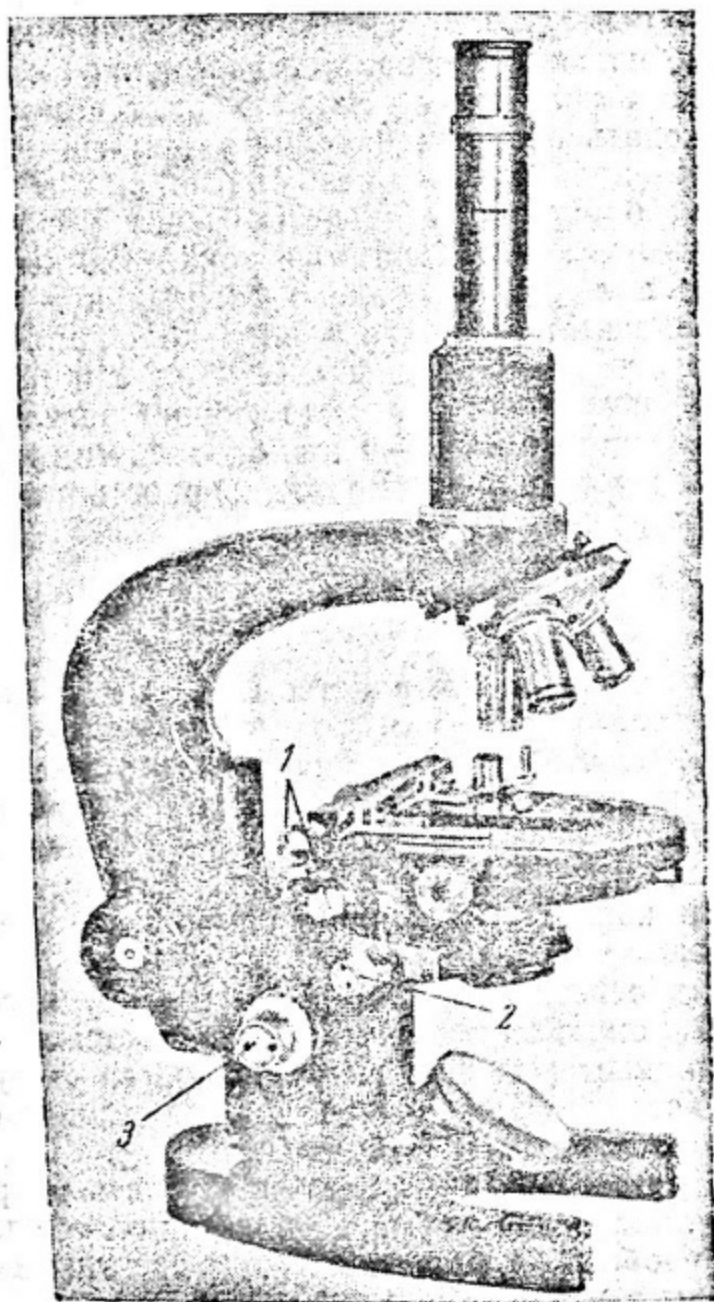


Рис. 11.2.

6. Отведя головку рисовального аппарата, выбрать в поле зрения отчетливо видимую броуновскую частицу, совершающую хаотическое движение.

7. После того как все мешающие факторы устранены и частица, наконец, выбрана, ее вводят в центр поля зрения с помощью винтов *I* (см. рис. 11.2), перемещающих предметный столик в двух взаимно перпендикулярных направлениях в горизонтальной плоскости. Затем опять вводят рисовальный аппарат и приступают к фиксации положений, последовательно занимаемых частицей. Провести несколько предварительных опытов, чтобы привыкнуть одинаково хорошо видеть частицу и острие карандаша.

Эту часть работы можно проводить двумя способами:

1. Работу проводят двое: один следит за частицей, держа ее с помощью микрометрического винта *З* (см. рис. 11.2) все время в фокусе и кончиком остро заточенного карандаша ставит точку через каждые 10 сек в тех местах, где показывается в эти моменты частичка, другой при этом следит за секундомером, отдает команды, когда необходимо ставить точки, и своим карандашом около каждой точки ставит очень маленькими цифрами порядковый номер (важно не перепутать последовательность точек) *.

2. Работа проводится одним наблюдателем. Время фиксируется на слух по ударам метронома, поставленного на 1 сек.

Для одной и той же частицы надо зафиксировать не менее 30 точек. Если частица уходит из поля зрения, то нужно выбрать новую частицу и все измерения повторить. Описанные выше измерения провести два раза и зарисовать две траектории броуновских частиц. Рисунки показать преподавателю и вместе выбрать траекторию для числовой обработки.

Примечание. Для того чтобы масштаб траектории броуновской частицы был равен увеличению микроскопа, столик рисовального аппарата должен быть на одном уровне со столиком микроскопа.

Положить на столик рисовального аппарата небольшой листок миллиметровой бумаги и, рассматривая его в поле зрения микроскопа, оценить примерный порядок линейных размеров броуновских частиц.

Пример. По сравнению с миллиметровым масштабом линейный размер частицы r равен 0,2 мм. Тогда истинный размер частицы $r_{\text{ист}} \approx \frac{0,2}{n}$ мм, где n — увеличение микроскопа.

* Если частица движется медленно, ее можно фиксировать через интервалы 15—20 сек.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

1. На рис. 11.3 изображен неблагоприятный случай, когда наличие течения приводит к нарушению полной хаотичности движения частицы, наблюдается снос частицы в некотором направлении. Чтобы исключить этот эффект, ось, на которую проектируют перемещения частицы, выбирают не произволь-

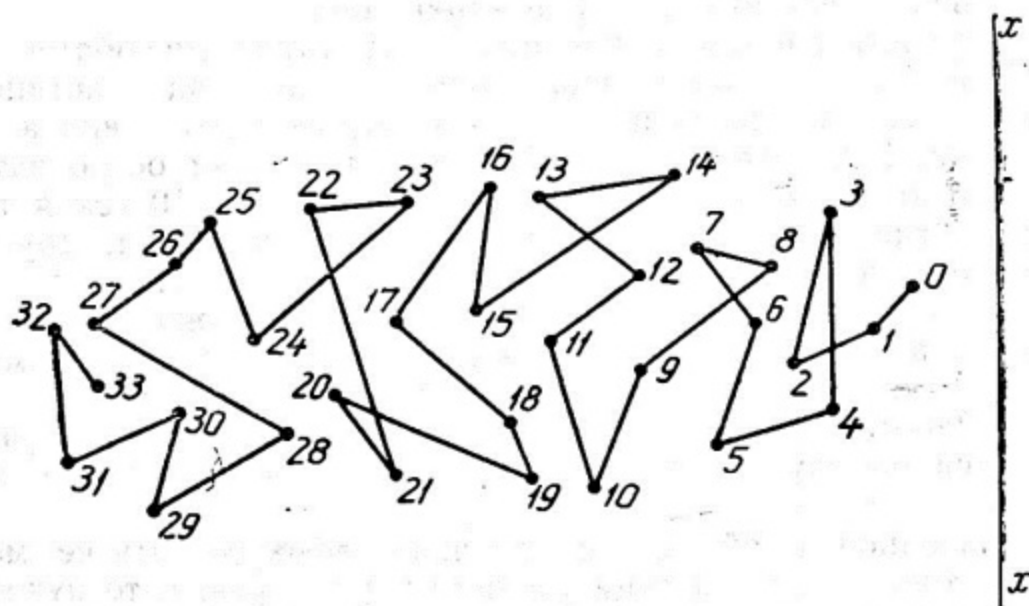


Рис. 11.3.

но, а так, как показано на рис. 11.3, т. е. перпендикулярно направлению сноса. Выбрав ось, проектируют на нее точки 0, 1, 2, 3, ...

После этого с помощью окуляр-микromетра измеряют проекции на оси перемещений 0—1, 1—2, 2—3, 3—4, ..., происходящих за интервал 10 сек. На отсчетной оси удобно выбрать положительное направление и проекции писать со знаком. Результаты следует заносить в таблицу (см. стр. 91).

2. Измерить и занести в таблицу проекции следующих перемещений (с учетом знака первоначальных проекций): 0—2, 1—3, 2—4 и т. д. Ту же операцию проделать для перемещений 0—3, 1—4, 2—5, 3—6 и т. д., соответствующих интервалам 30 сек.

3. Усреднить квадраты проекций перемещений за интервалы 10, 20, 30 сек.

Таблица

Проекции перемещений частицы на ось x и их квадраты x^2 за определенное время

10 сек			20 сек			30 сек		
Номера интервалов	x , мм	x^2 , мм ²	Номера интервалов	x , мм	x^2 , мм ²	Номера интервалов	x , мм	x^2 , мм ²
0—1	15	225	0—2	22	484	0—3	19	396
1—2	7	49	1—3	4	16	1—4	5	25
2—3	-3	9	2—4	-2	4	2—5
3—4	1	1	3—5
...
29—30			28—30			27—30		
—	—	$\bar{x}_{10}^2 = \frac{\sum x^2}{n} = \dots$	—	—	$\bar{x}_{20}^2 = \frac{\sum x^2}{n-1} = \dots$	—	—	$\bar{x}_{30}^2 = \frac{\sum x^2}{n-2} = \dots$

Примечание. В таблицу внесены числа, полученные при обработке одной из траекторий частицы. В данном примере $n=30$.

4. Полученные значения \bar{x}^2 нанести на график, по оси абсцисс которого отложить время t , а по оси ординат — средние квадраты проекций \bar{x}^2 (мм^2). Через нанесенные точки провести прямую линию, учитывая возможный их разброс вследствие влияния ошибок измерений. Линейный характер зависимости $\bar{x}^2 = f(t)$ доказывает справедливость закона Эйнштейна для броуновского движения.

5. Из графика вычислить тангенс угла наклона прямой

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta \bar{x}_{\text{ист}}^2}{\Delta t}.$$

При вычислении тангенса учесть, что $\Delta \bar{x}_{\text{ист}}^2 = \frac{\Delta \bar{x}^2}{n^2}$, где n — увеличение микроскопа.

6. Из формулы (11.1) следует, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{RT}{3\pi\eta rN}.$$

По значению тангенса можно определить произведение rN . Принимаем температуру суспензии равной комнатной, а ее вязкость равной вязкости воды. Затем по известному значению числа Авогадро определяем радиус броуновской частицы r и сравниваем порядок величины r с линейными размерами частицы, определенными непосредственно на столике рисовального аппарата.

В данном случае речь идет только об определении порядка величины, так как в действительности частица имеет несферическую форму и температуру суспензии выше комнатной.

7. Оценить тщательность проведения эксперимента и правильность выбора направления сноса броуновской частицы.

Если измерения перемещений броуновской частицы проведены тщательно, то выполняется неравенство

$$\frac{\Delta(\bar{x}_i^2)}{\bar{x}_i^2} \leq 0,1,$$

где \bar{x}_i^2 — средние квадраты проекций перемещений точек, полученные в п. 4; $\Delta(\bar{x}_i^2)$ — отклонение этих точек от прямой $\bar{x}^2 = f(t)$. Если направление сноса частицы выбрано правильно, прямая $\bar{x}^2 = f(t)$ проходит через начало координат. Почему при неправильном определении направления сноса прямая не пройдет через начало координат?

Работа 12

ПОЛУЧЕНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ ВАКУУМА

ВВЕДЕНИЕ

Вакуумом называется состояние газа при давлениях ниже атмосферного. Критерием вакуума может служить отношение средней длины свободного пробега молекул к размерам сосуда. Когда давление газа уменьшается настолько, что длина свободного пробега молекулы оказывается больше размеров сосуда, поведение газа меняется. В частности, коэффициенты внутреннего трения и теплопроводности обнаруживают зависимость от давления. Особенности вакуума могут проявиться и при атмосферном давлении, когда газ пропускают через пористые перегородки с размером пор около 10^{-7} см. Но в большинстве случаев свойства вакуума проявляются начиная с давлений, лежащих в диапазоне $1-10^{-3}$ мм рт. ст.

Вакуум может быть получен в достаточно герметичных установках (стеклянных или металлических) с помощью специальных насосов. Предварительное разрежение до 10^{-3} мм рт. ст. обычно создается с помощью форвакуумных насосов (рис. 12.1).

Рабочая полость насоса представляет собой цилиндрическую камеру 2, в которой вращается ротор 1, расположенный эксцентрично по отношению к камере 2. В роторе высверливаются полости для смещения центра тяжести к оси вращения.

Пластина 5 скользит вдоль прорези в стенке камеры 2 и при этом плотно прижимается к внешней поверхности ротора рычагом 4. Процесс откачки происходит следующим

образом. В положении *I* (см. рис. 12.1) ротор находится в исходном состоянии. В положении *II* ротор подвинулся вниз и в камере 2 создано расширение со стороны впускного отверстия 6. В это расширение входит газ из вакуумной системы. Одновременно происходит сжатие газа в сто-

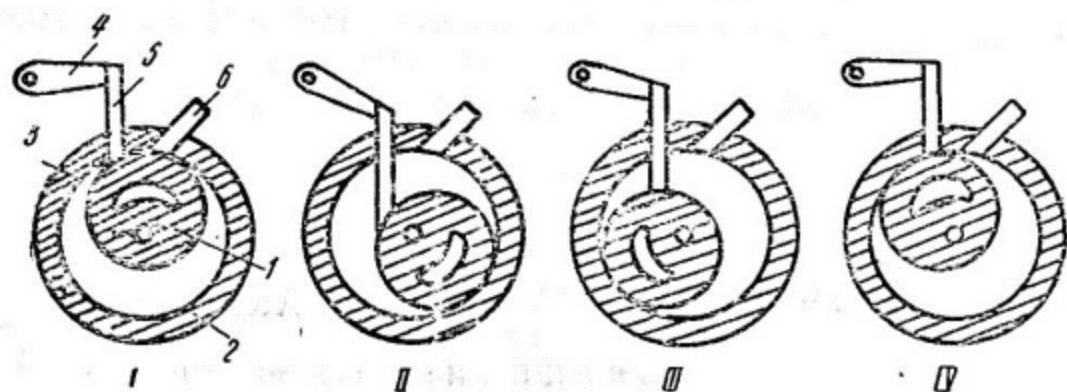


Рис. 12.1.

рону выпускного отверстия 3. В положении *III* происходит дальнейшее всасывание газа из вакуумной системы и выход сжатого газа через выпускное отверстие 3. Положение *IV* совпадает с начальным положением *I*.

Ротор вращается со скоростью несколько сот оборотов в минуту. Места соприкосновения внутренней поверхности цилиндра 2 с ротором 1 и пластиной 5 должны хорошо смазываться. Для этого вся рабочая часть насоса помещается в коробку, в которую наливается масло. Насосы этого типа называют вращательными масляными насосами.

Для создания разрежения газа от 10^{-3} до 10^{-7} мм рт. ст. в вакуумных установках последовательно с насосами, создающими предварительное разрежение, включаются пароструйные насосы. Наилучшими считаются диффузионно-конденсационные паротурбинные и паромасляные насосы (рис. 12.2). Принцип действия этих насосов основан на использовании откачивающего действия струи пара рабочей жидкости. Струя пара, образовавшегося в подогреваемом испарителе 1, проходит через паропровод 2 в сопло 5, после чего оказывается в объеме, соединенном с патрубком предварительного вакуума 6.

Молекулы газа, продиффундировавшие из откачиваемой системы через впускное отверстие 4, адсорбируются парами рабочей жидкости и вместе со струей пара уносятся к основанию насоса. Здесь наступает конденсация паров вследст-

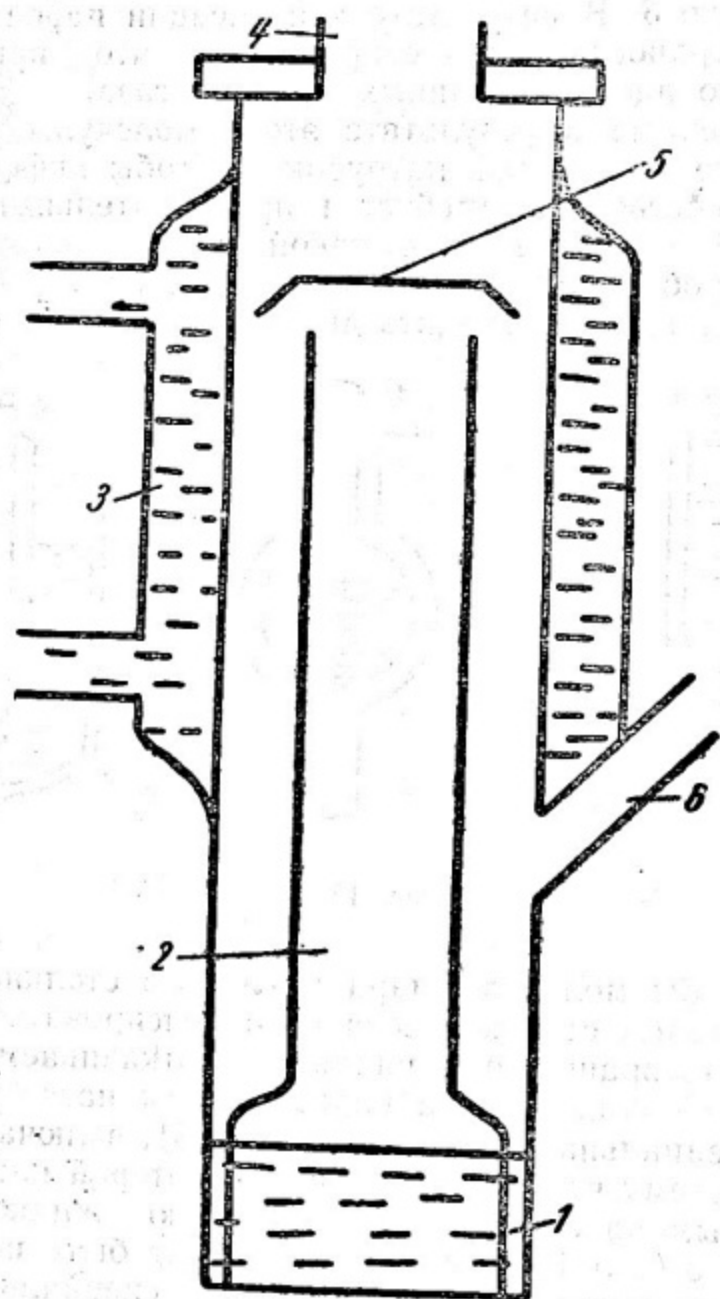


Рис. 12.2.

вие охлаждения корпуса насоса водой, циркулирующей в водяной рубашке 3. В результате конденсации паров адсорбирующая поверхность резко сокращается, что приводит к освобождению адсорбированных молекул газа.

Освобожденные в результате этого молекулы газа поступают далее в выходной патрубок 6. Чтобы диффузионный насос мог действовать, требуется предварительный вакуум порядка 10^{-2} мм рт. ст., т. е. такой, при котором средний свободный пробег молекулы газа уже достаточно велик для того, чтобы могла происходить диффузия газа в струю пара,

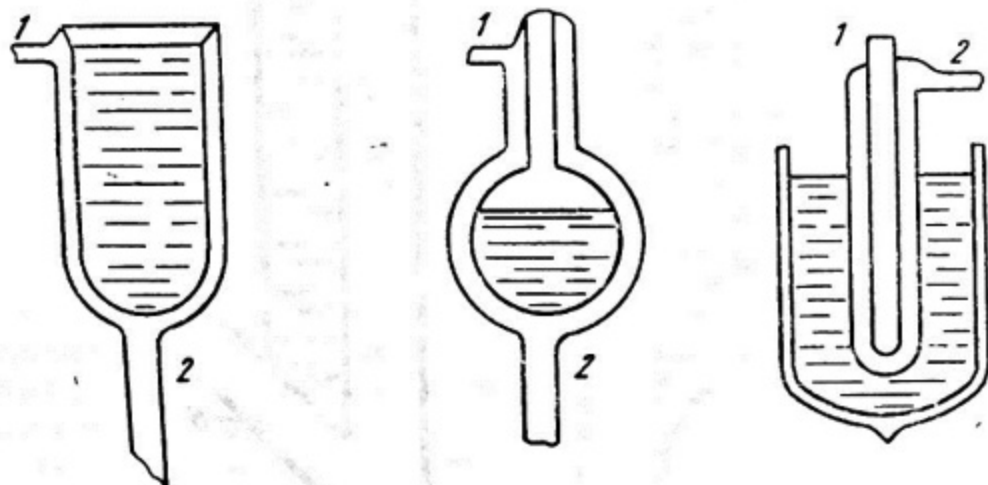


Рис. 12.3.

а также, чтобы молекулы пара могли без столкновений достигать холодных стенок насоса и конденсироваться.

Для предотвращения попадания в откачиваемый объем паров рабочей жидкости за пароструйным насосом устанавливается специальная ловушка (рис. 12.3), включаемая в вакуумную систему через вводы 1 и 2, в которой пары рабочей жидкости вымораживаются с помощью жидкого азота. Вакуум от 10^{-7} до 10^{-11} мм рт. ст. может быть получен при использовании ионных насосов, а также специальных поглотителей (геттеров).

Измерение вакуума в зависимости от степени разрежения газа производится с помощью вакуумметров различных типов. Для измерения давления от сотен до десятых долей миллиметра ртутного столба применяются ртутные и масляные U-образные манометры (рис. 12.4). Иногда такие манометры используются в укороченном варианте. В этом случае они позволяют определить давления, меньшие атмосфер-

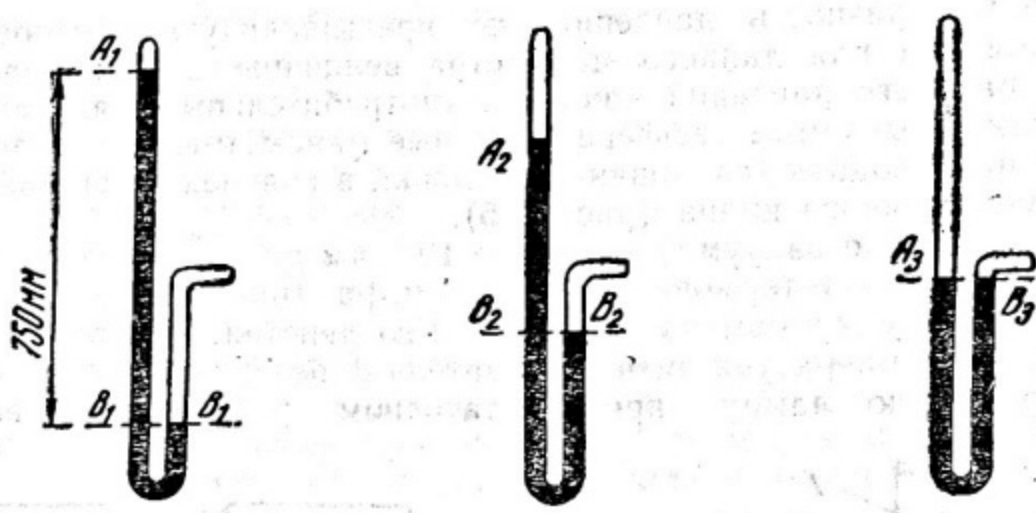


Рис. 12.4.

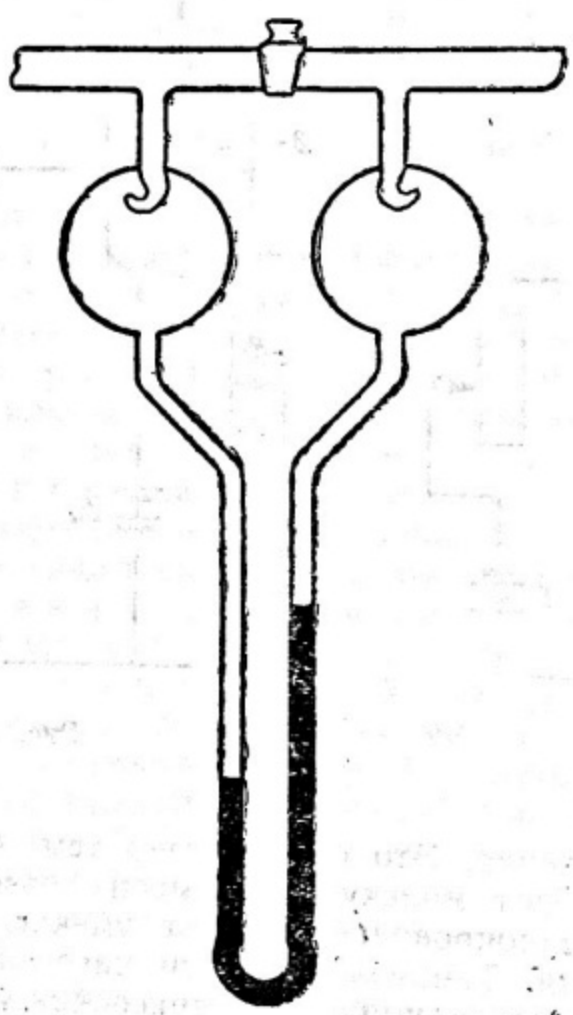


Рис. 12.5.

ного или разность давлений, не превышающую некоторой постоянной для данного манометра величины. Для измерения разности давлений наиболее употребительными являются так называемые дифференциальные манометры, позволяющие производить уравнивание давлений в коленах с помощью промежуточного крана (рис. 12.5).

Измерение вакуума от 10^{-1} до 10^{-3} мм рт. ст. производится с помощью термоманометра (рис. 12.6), соединяемого с вакуумом патрубком 1. Его действие основано на том, что температура нити нагревателя 2, помещенной в манометрическую лампу, при достаточном разрежении газа

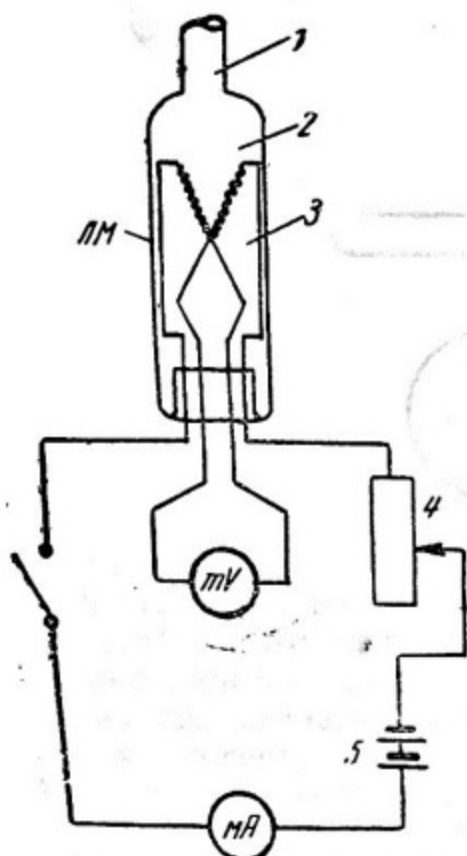


Рис. 12.6.

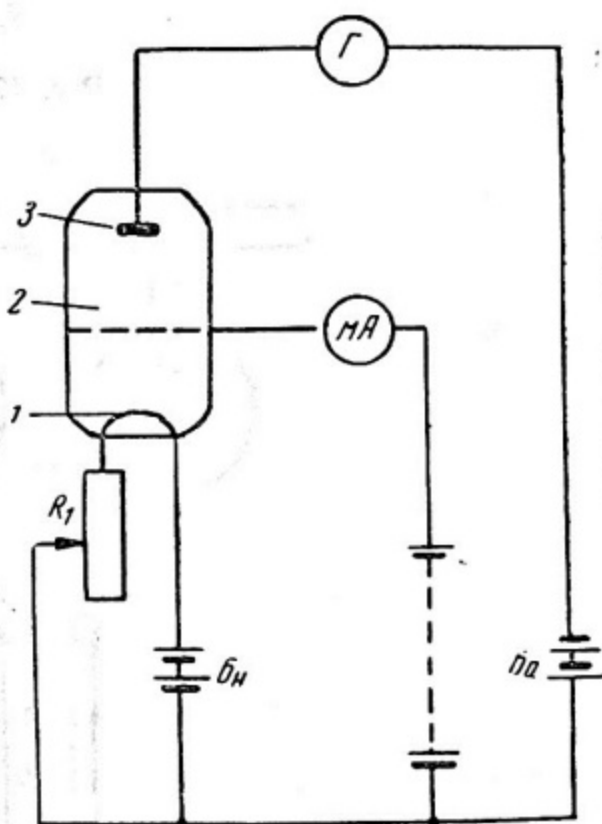


Рис. 12.7.

зависит от давления. Это обусловлено тем, что при длине свободного пробега молекул, большей размеров лампы, коэффициент теплопроводности газа уменьшается с понижением давления. Температура нити нагревателя регистрируется с помощью термопары 3, присоединенной к милливольтметру. Нагреватель, включаемый ключом, питается от

источника тока через сопротивление 4. В цепь нагревателя включен миллиамперметр.

Вакуум от 10^{-3} до 10^{-7} мм рт. ст. измеряется с помощью ионизационного манометра. Лампа этого манометра (рис. 12.7) представляет собой триод, на сетку 2 которого подан положительный потенциал относительно катода 1 (обычно от +120 до +250 в). К коллектору 3 подан отрицательный потенциал (от -10 до -30 в). Основная часть эмитируемых катодом электронов пролетает сквозь сетку: электроны отражаются полем коллектора и, прежде чем попасть на сетку, совершают многочисленные колебания около нее. При этом происходит интенсивная ионизация молекул воздуха. Образовавшиеся положительные ионы улавливаются коллектором. Отношение регистрируемого гальванометром ионного тока к электронному, измеряемому миллиамперметром характеризует давление газа. Таким образом, измерение давления газа сводится в этом случае к измерению ионного тока при заданной эмиссии электронов из катода.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Приборы и принадлежности: вакуумная установка с ротационным масляным и диффузионным паромасляным насосами, вакуумметр ионизационно-термопарный (ВИТ-1), секундомер, макеты ротационного и диффузионного насосов.

Вакуумная установка, используемая в данной работе (рис. 12.8), включает основные элементы применяемых в настоящее время вакуумных систем. Предварительное разрежение создается форвакуумным насосом 1, присоединенным к установке гибким вакуумным шлангом 2, надетым на патрубков трехходового крана 3. С помощью этого крана можно соединить насос с установкой или с атмосферой.

Последовательно с форвакуумным насосом включен диффузионный паромасляный насос 5 с ловушкой 6, охлаждаемой жидким азотом. Между насосами расположен так называемый форвакуумный баллон 4, дающий возможность кратковременно выключать форвакуумный насос, не выключая диффузионного. Роль этого баллона состоит в том, что его объем снижает скорость нарастания давления на выходе диффузионного насоса при выключенном форвакуумном насосе.

Для измерения давления в установке предусмотрен ртутный U-образный манометр 7, а также лампы ЛТ и ЛМ

термопарного и ионизационного манометров. Измерительные схемы этих манометров заблокированы в одном приборе ВИТ-1 (правила работы с прибором изложены в приложении).

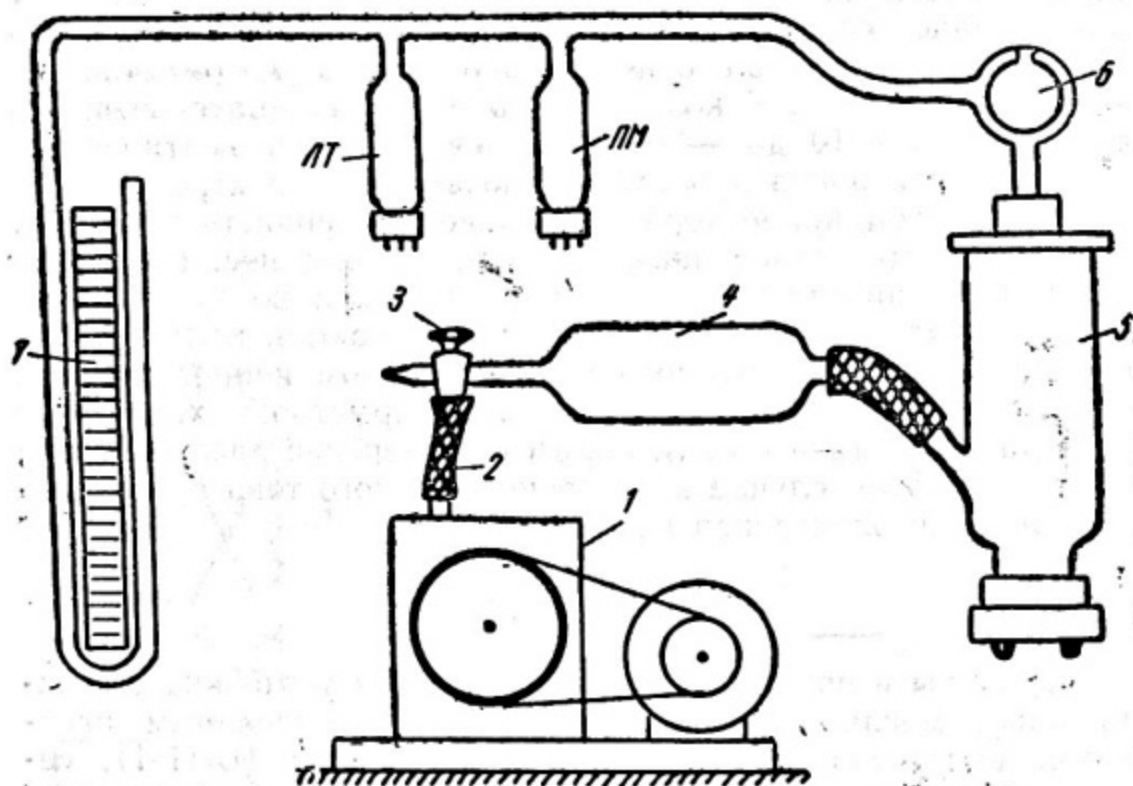


Рис. 12.8.

ЗАДАНИЯ

1. Ознакомление с вакуумной установкой и приборами для получения и измерения вакуума

1. Ознакомиться с устройством вакуумной установки и определить соответствие между ее схемой, изображенной на рис. 12.8, и самой установкой.

2. Осмотреть макет двухступенчатого форвакуумного насоса и, вращая ротор, проследить действие насоса при откачке газа.

3. Разобрать и собрать макет диффузионного паромасляного двухступенчатого насоса и объяснить его действие.

4. Изучить правила работы с вакуумметром ВИТ-1. Не включая питания вакуумметра, освоить порядок включения и выключения термопарного и ионизационного манометров.

2. Изучение откачивающего действия форвакуумного насоса

С помощью U-образного ртутного манометра определить давление в установке. Если оно заметно ниже атмосферного, подать в установку воздух несколькими поворотами трехходового крана (см. рис. 12.8). Не следует прилагать к крану большие усилия, а также производить его поворот резко. При повороте, кроме того, рекомендуется фиксировать корпус крана рукой. Включить форвакуумный насос и поворотом крана соединить его с установкой.

1. Снять зависимость давления в установке от времени работы форвакуумного насоса с момента его подключения к установке. Давление измерять первоначально по ртутному U-образному манометру*. При работе с ртутным манометром следует соблюдать особую осторожность. Если ртуть будет разлита, немедленно сообщить об этом преподавателю и дежурному лаборанту.

Когда давление достигнет 1—2 мм рт. ст., включить термометрический манометр согласно инструкции и в дальнейшем измерять по нему давление. Промежутки времени между измерениями выбирают так, чтобы отсчитывать примерно одинаковые изменения давления. Поэтому при быстром изменении давления показания манометра снимают через малые промежутки времени, а при малых изменениях давления промежутки времени между отсчетами увеличивают.

Откачку установки производить до предельного вакуума, создаваемого форвакуумным насосом, т. е. до тех пор, пока давление не перестанет изменяться.

2. Построить график зависимости давления в установке от времени откачки, отложив по оси ординат десятичный логарифм давления, а по оси абсцисс — время. (Такой график называется полулогарифмическим; при его построении желательно использовать миллиметровую бумагу с полулогарифмическим масштабом.)

3. Изучение откачивающего действия диффузионного паромасляного насоса

1. Включить охлаждение водяной рубашки диффузионного насоса. Убедившись в том, что давление в установке не

* В начале откачки давление в установке падает очень быстро, поэтому отсчеты давления по U-образному манометру следует производить как можно чаще.

превышает 10^{-2} мм рт. ст., включить нагреватель диффузионного насоса. Следить за давлением в установке по термоманометру. Когда показания термоманометра укажут на начало действия диффузионного насоса, включить лампу ЛМ-2 ионизационного манометра на «Прогрев» согласно инструкции. По достижении давления $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. в ловушку следует залить жидкий азот примерно до половины ее объема. Давление ниже 10^{-3} мм рт. ст. измеряют ионизационным манометром.

Жидкий азот заливается в ловушку из сосуда Дьюара, представляющего собой стеклянную колбу с двойными стенками, между которыми находится откачанная термоизолирующая полость. Для уменьшения лучистого теплообмена внутренние стенки этой полости посеребрены. При работе с сосудом Дьюара нельзя допускать его соприкосновения со стенками ловушки. Не рекомендуется также приближать его к лицу ближе, чем на расстояние вытянутой руки; необходимо пользоваться защитными очками. Следует иметь в виду, что этот сосуд может лопнуть без видимых причин, разлетевшись на мелкие осколки.

По мере выкипания азота следует доливать его в ловушку с таким расчетом, чтобы к моменту выключения нагревателя насоса ловушка была почти пустой.

2. Снять зависимость давления в установке от времени работы диффузионного насоса с момента его включения.

3. Построить полулогарифмический график изменения давления в установке от времени (см. задание 2).

ВЫКЛЮЧЕНИЕ ВАКУУМНОЙ УСТАНОВКИ

Когда в ловушке почти не останется жидкого азота, выключить нагреватель диффузионного насоса и вакуумметры. Циркуляцию воды в рубашке охлаждения не прекращать до полного остывания насоса. При комнатной температуре процесс остывания насоса длится не менее получаса. Убедившись в том, что диффузионный насос остыл, отсоединить установку от форвакуумного насоса с помощью трехходового крана.

Прекращение откачки установки форвакуумным насосом при работающем диффузионном насосе и тем более контакт последнего в рабочем состоянии с атмосферой недопустимы. В противном случае под действием противодействия на выходе насоса молекулы воздуха проникнут в его рабочий

объем и вызовут окисление рабочей жидкости. Это сразу же выведет насос из строя.

Выключить форвакуумный насос, сразу же соединив его с атмосферой. Если это требование не выполнить, то под действием атмосферного давления масло из ванны, в которую помещена цилиндрическая камера насоса (см. рис. 12.1), проникнет в резиновый шланг, а при открытом трехходовом кране и в установку.

Выключить охлаждение диффузионного насоса.

Примечание. Вакуумная установка при условии хорошей герметичности сохраняет вакуум в течение длительного времени. Поэтому при последующем включении установки форвакуумный насос подсоединяется к ней не сразу, а после нескольких минут работы при нейтральном положении трехходового крана. Если это условие не выполнить, то в установку проникнет воздух, содержащийся в шланге и входном патрубке насоса в нерабочем положении.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ОПИСАНИЕ ВАКУУММЕТРА ВИТ-1 И ПРАВИЛА РАБОТЫ С НИМ

Назначение прибора

Ионизационно-термопарный вакуумметр типа ВИТ-1 представляет собой комбинированную измерительную установку, состоящую из ионизационного манометра типа ЛМ-2, термопарного манометра с лампой ЛТ-2, электронной измерительной схемы, схемы для питания нагревателя термопары и прибора, измеряющего термоэлектродвижущую силу или ток накала нагревателя термопары.

Общий диапазон давлений, измеряемых вакуумметром, составляет $1 \cdot 10^{-1}$ — $1 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. Давление в пределах от $1 \cdot 10^{-1}$ до $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. измеряется термопарным манометром, от $1 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. — ионизационным. Последний в свою очередь имеет четыре поддиапазона измерения давления, которые определяются положением переключателя «Множитель шкалы»:

1-й поддиапазон (множитель 10^3) — от $1 \cdot 10^{-3}$ до $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.;

2-й поддиапазон (множитель 10^2) — от $1 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст.;

3-й поддиапазон (множитель 10) — от $1 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст.;

4-й поддиапазон (множитель 1) — от $1 \cdot 10^{-6}$ до $5 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст.

Градуировка ионизационного манометра дана по сухому воздуху с непосредственным отсчетом давления по шкале прибора. Термопарный манометр рассчитан на работу с термопарой ЛТ-2, без прямого отсчета давления по шкале прибора. Отсчет т. э. д. с. производится по шкале, имеющей 100 делений, а затем по прилагаемому графику переводится в давление (мм рт. ст.).

Управление прибором

Прибор ВИТ-1 смонтирован на железном шасси и наклонной передней панели. На левой стороне панели расположены выключатель термопарного манометра и ручка регулировки тока накала нагревателя термопары, под прибором помещен переключатель, с помощью которого прибор переключается из цепи нагревателя в цепь термопары.

На правой стороне панели помещены переключатель прогрева сетки ЛМ-2 и реостат калибровки усилителя, под прибором — выключатель цепи ионного тока ЛМ-2 «Установка нуля — измерение» и переключатель прибора, переводящий его из цепи усилителя ионного тока («Измерение») в цепь тока эмиссии ЛМ-2 («Эмиссия»).

В нижней части передней панели расположены ручки переключателя шкал, потенциометра регулировки тока эмиссии, потенциометра регулировки нуля, выключателя накала ЛМ-2 с сигнальной лампой и выключателя питающей сети с сигнальной лампой.

Подготовка прибора к работе и измерение давления

Перед включением вакуумметра необходимо убедиться, что накал ионизационного манометра ЛМ-2 выключен, т. е. выключатель с гравировкой «Накал ЛМ-2» поставлен вниз против указания стрелки.

Вакуумметр термопарный

1. Проверка на работоспособность. Поставить реостат «Регулировка тока накала» в крайнее левое положение, включить переключатель «Ток накала». Включить штепсель-

ную вилку в сеть 220 в. Включить тумблеры «Термовакуумметр» и «Сеть 220 в», при этом должна загореться сигнальная лампа (слева на панели).

Реостатом «Регулировка тока накала» установить по нижней шкале прибора термовакуумметра ток порядка 110 ма.

Если ток накала регулируется и при установке переключателя «Ток накала — измерение» в положение «Измерение» стрелка прибора отклоняется, то вакуумметр и термопара работоспособны.

2. Измерение давления. Тумблер «Ток накала — измерение» поставить в положение «Ток накала» и с помощью реостата «Регулировка тока накала» установить ток накала по нижней шкале прибора по указанию преподавателя или лаборанта.

Затем тумблер «Ток накала — измерение» поставить в положение «Измерение» и по средней шкале прибора определить т. э. д. с. лампы ЛТ-2 в делениях шкалы. Отсчет в делениях перевести в давление по градуировочной кривой термопары ЛТ-2, приложенной к прибору. Получив давление 10^{-3} мм рт. ст., перейти к измерению давления с помощью ионизационного манометра ЛМ-2.

Вакуумметр ионизационный

1. Перед включением ионизационного вакуумметра необходимо убедиться, что давление в обследуемом объекте не выше, чем 10^{-3} мм рт. ст. Включение лампы ЛМ-2 при давлении выше, чем 10^{-3} мм рт. ст. может привести к выходу ее из строя.

2. Прогрев лампы ЛМ-2 ионизационного манометра. Тумблер «Установка нуля — измерение» включить в положение «Измерение», тумблер «Эмиссия ЛМ-2 — измерение» — в положение «Эмиссия ЛМ-2» и с помощью тумблера «Накал ЛМ-2» включить прогрев лампы. В это время должна загореться сигнальная лампа и стрелка прибора устанавливается в середине шкалы, возле риски с индексом А. Длительность прогрева 5—10 мин.

3. Подготовка к измерениям. Включить тумблер «Установка нуля — измерение» в положение «Установка нуля», а тумблер «Эмиссия ЛМ-2 — измерение» в положение «Измерение» и с помощью реостата «Регулировка нуля» установить на правом приборе нуль по шкале.

Затем поставить тумблер «Измерение — прогрев» в положение «Измерение», тумблер «Установка нуля — измерение» в положение «Измерение», тумблер «Эмиссия ЛМ-2 — измерение» в положение «Эмиссия ЛМ-2» и с помощью реостата «Регулировка эмиссии» установить ток эмиссии 5 *ми*. Тумблер «Эмиссия ЛМ-2 — измерение» включить в положение «Измерение». Множитель шкалы установить в такое положение, при котором будет удобно вести отсчеты по измерительному прибору. Давление в откачиваемом объекте равно отсчету по измерительному прибору, умноженному на соответствующий множитель переключателя шкалы.

Примечание. В случае быстрого ухода стрелки вправо до ограничителя (что возможно, если давление в объеме больше 10^{-3} *мм рт. ст.*) следует тумблер «Эмиссия ЛМ-2 — измерение» переключить в положение «Эмиссия ЛМ-2», тумблер «Измерение — прогрев» поставить в положение «Прогрев» и реостат «Регулировка эмиссии» вывести до конца влево.

4. Выключение прибора ВИТ-1.

Ионизационный манометр

Установить тумблер «Накал ЛМ-2» в нижнее положение, тумблер «Измерение — прогрев» в положение «Прогрев», а тумблер «Эмиссия ЛМ-2 — измерение» в положение «Эмиссия ЛМ-2».

Термопарный манометр

Тумблер «Ток накала — измерение» поставить в положение «Ток накала», а тумблер «Термовакуумметр» опустить вниз. Тумблером «Сеть 220 в» выключить питание прибора ВИТ-1.

Работа 13

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА МЕТОДОМ ИСТЕЧЕНИЯ ИЗ КАПИЛЛЯРА

ВВЕДЕНИЕ

Существуют различные способы определения коэффициентов вязкости жидкостей и газов. В I части «Физического практикума» в работе 11 вязкость жидкостей определялась по методу Стокса.

В этой и последующей работах используются два способа определения вязкости газа, основанные на уравнении Ньютона:

$$f_{\text{тр}} = \eta \frac{dv}{dz} S, \quad (13.1)$$

где η — коэффициент вязкости; $\frac{dv}{dz}$ — градиент скорости; S — величина поверхности, по которой действует сила $f_{\text{тр}}$.

На основе формулы (13.1) Пуазейль произвел расчет объема V вязкой несжимаемой жидкости, протекающей за время t через цилиндрическую трубку постоянного сечения и получил

$$V = \frac{\pi r^4}{8\eta} \cdot \frac{dp}{dx} t, \quad (13.2)$$

где r — радиус трубки; η — коэффициент вязкости жидкости; $\frac{dp}{dx}$ — модуль градиента давления, одинаковый по всей длине трубки.

Формула Пуазейля применима и к течению газа по трубке, если сжимаемостью газа можно пренебречь. Это возмож-

но при малых перепадах давления на концах трубки и ламинарном течении газа при постоянной температуре. О характере течения можно судить по значению числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho \bar{v} r}{\eta}, \quad (13.3)$$

где ρ — плотность; \bar{v} — средняя скорость течения; r — радиус трубки. При $Re < 1000$ течение ламинарно, при $Re > 1000$ — турбулентно.

При соблюдении этих условий модуль градиента давления можно принять равным отношению модуля разности давлений у концов трубки к ее длине

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\Delta p}{l} = \frac{|p_1 - p_2|}{l}, \quad (13.4)$$

причем $\Delta p = |p_1 - p_2| \ll p_2 \approx p_{ат}$.

Молекулярнокинетическая теория позволяет вывести следующее выражение для определения коэффициента вязкости газов:

$$\eta = 0,499 \rho \bar{u} \bar{\lambda},$$

где \bar{u} — средняя тепловая скорость; $\bar{\lambda}$ — средний свободный пробег молекул газа.

Подставляя в приведенное уравнение значения ρ , \bar{u} и $\bar{\lambda}$, получим выражение, связывающее коэффициент вязкости газа с эффективным диаметром его молекул d :

$$\eta = 0,176 \frac{\sqrt{RT\mu}}{Nd^2}, \quad (13.5)$$

где R — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура; μ — масса грамм-молекулы газа; N — число Авогадро.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

2. **Приборы и принадлежности:** установка для измерения вязкости по истечению из капилляра, секундомер, отсчетный микроскоп с осветителем, штангенциркуль или линейка.

Цилиндрический стеклянный баллон Б при открытом кране K_1 может быть наполнен водой из резервуара Р, если последний поднят выше баллона (рис. 13.1). При наполнении баллона водой кран K_2 должен быть установлен в положение, показанное на рис. 13.2, а, чтобы воздух, находящийся

ся в баллоне, мог выходить в атмосферу. Если затем кран K_2 перевести в положение, показанное на рис. 13.2, б, и опустить резервуар вниз, то вода из баллона будет поступать обратно в резервуар Р.

С понижением уровня воды в баллоне Б в него будет засасываться воздух из атмосферы через осушитель О и ка-

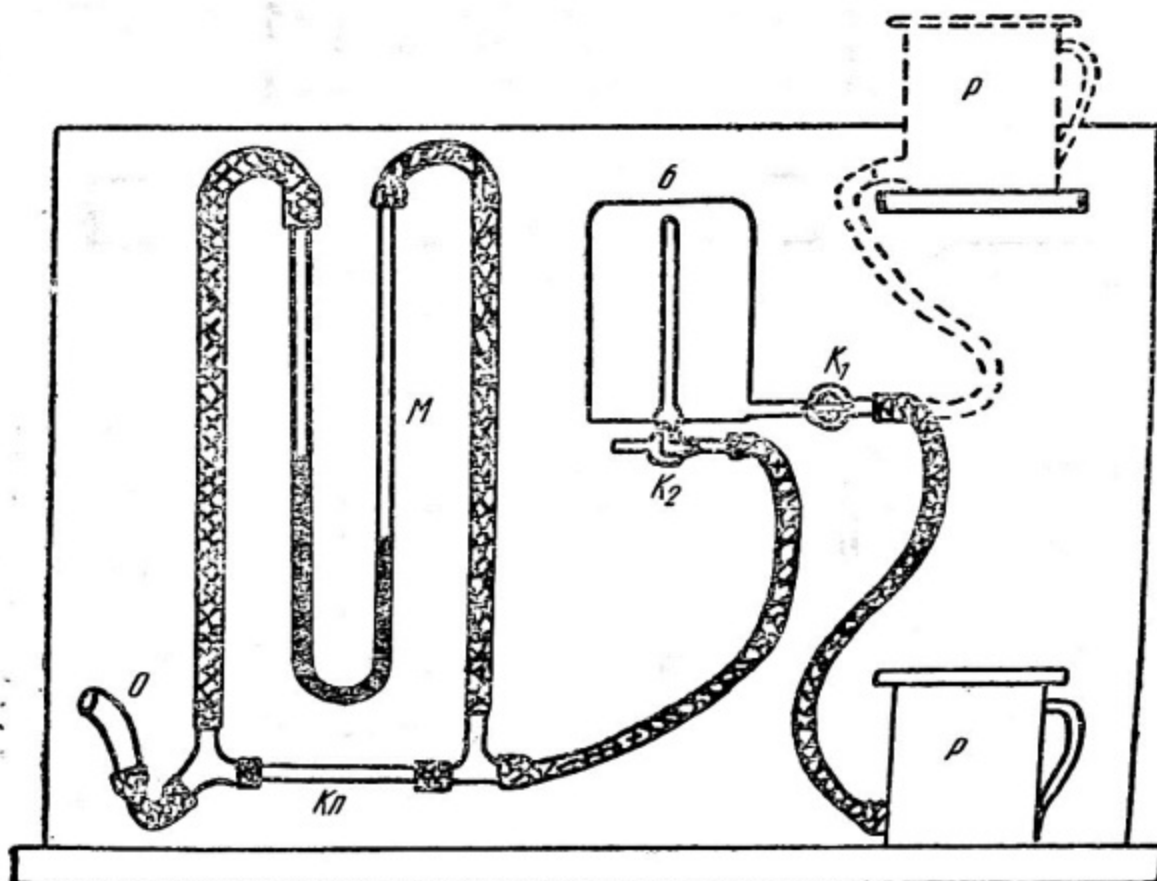


Рис. 13.1.

пиллярную трубку K_1 . Для измерения объема воздуха, протекшего через капиллярную трубку, баллон снабжен шкалой, проградуированной в миллиметрах. Если температуры атмосферного воздуха и воды в баллоне одинаковы, объем вытекшей из него воды равен объему протекшего через капиллярную трубку воздуха.

Разность давлений, возникающая на концах капиллярной трубки, измеряется с помощью масляного U-образного манометра M , снабженного шкалой для отсчета разности уровней масла.

Все узлы установки смонтированы на вертикально расположенной раме. Диаметр капиллярной трубки измеряется с помощью отсчетного микроскопа, а время протекания воздуха — по секундомеру.

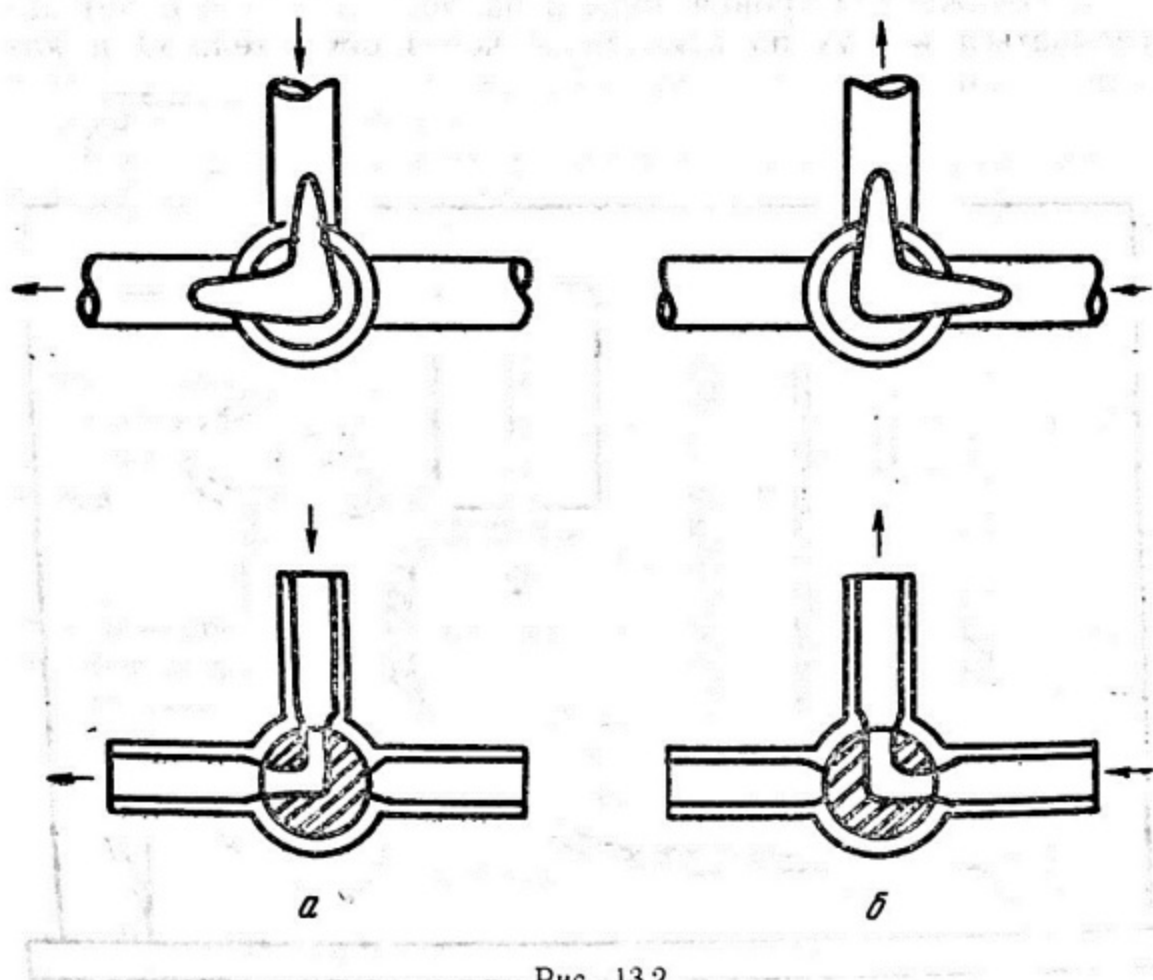


Рис. 13.2.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Снять капиллярную трубку с установки и, измерив ее длину и диаметр отверстия, вставить трубку на прежнее место.

2. При открытом кране K_1 поставить резервуар на полку и открыть кран K_2 на атмосферу. Приоткрывая кран K_1 , наполнить баллон водой несколько выше отметки 1750 мл.

Предостережение. При наполнении баллона водой нужно следить за тем, чтобы вода не попала в вертикальную трубку, через которую воздух засасывается в баллон. Попадание

воды в капиллярную трубку и V-образный манометр выводит установку из строя.

3. Закрыв кран K_1 , переставить резервуар на стол и повернуть кран K_2 в положение, показанное на рис. 13.2, б. Осторожно приоткрыть кран K_1 . Отрегулировать сток воды из баллона так, чтобы разность уровней масла в коленах манометра составляла примерно 5 см.

Предостережение. При полном и резком открывании крана K_1 , когда кран K_2 повернут на капилляр, из-за возникающего большого перепада давлений на концах капиллярной трубки масло V-образного манометра может попасть в капиллярную трубку и в баллон с водой, в результате чего установка выйдет из строя.

4. Когда уровень воды в баллоне достигнет отметки 1750 мл, включить секундомер и измерить время вытекания 250 мл воды. При вытекании больших количеств воды происходит значительное изменение перепада давлений на концах трубки за время опыта.

5. Повторяя операции пп. 2—4, произвести измерения не менее 10 раз. В начале и в конце измерений записать температуру воздуха в помещении. Взять среднее из обоих значений.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Определить вязкость воздуха по формулам (13.2) и (13.4), перепад давления определить из соотношения $\Delta p = \rho gh$.

2. Вычислить число Рейнольдса для течения воздуха в капиллярной трубке. Среднюю скорость \bar{v} течения воздуха в капилляре определить из расхода: $V = \bar{v} t$, где s — площадь сечения капилляра; V — объем воздуха, прошедшего через капилляр за время t . Выполняются ли условия применимости формулы Пуазейля (13.2) к течению воздуха по трубке.

3. По формуле (13.5) рассчитать средний эффективный диаметр молекул воздуха.

4. Рассчитать погрешность прямых и косвенных измерений коэффициента вязкости и определить доверительную вероятность.

Работа 14

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА ПО КОЛЕБАНИЯМ ДИСКА

ВВЕДЕНИЕ

Вязкость газов характеризуется коэффициентом внутреннего трения (вязкости) η , зависящим от природы газа и температуры. Элементарная молекулярнокинетическая теория дает для коэффициента внутреннего трения (вязкости) газов следующее выражение:

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \bar{u} \bar{\lambda},$$

где ρ — плотность газа; \bar{u} — средняя скорость теплового движения молекул; $\bar{\lambda}$ — средняя длина свободного пробега молекул.

Более строгая теория позволяет вывести формулу

$$\eta = 0,499 \rho \bar{u} \bar{\lambda}. \quad (14.1)$$

При не слишком малых давлениях коэффициент вязкости не зависит от давления. Это объясняется тем, что плотность газа прямо пропорциональна, а средняя длина свободного пробега обратно пропорциональна давлению. В области низких давлений длина свободного пробега ограничена размерами объема, в котором наблюдается внутреннее трение в газе (например, в данной работе — расстоянием между дисками), и, следовательно, перестает зависеть от давления. Поэтому коэффициент внутреннего трения обнаруживает такую же зависимость от давления, как и плотность, т. е. убывает с давлением по линейному закону.

Повышение температуры приводит к увеличению коэффициента внутреннего трения газа, поскольку скорость при этом возрастает.

Согласно молекулярнокинетической теории

$$\rho = n \frac{\mu}{N}; \quad (14.2)$$

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}; \quad (14.3)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n}, \quad (14.4)$$

где n — число молекул в единице объема газа; μ — масса моля; N — число Авогадро; R — универсальная газовая постоянная; T — температура газа, °К; d — эффективный диаметр молекулы.

Решая совместно уравнения (14.1) — (14.4), можно получить выражение

$$d = \left(\frac{\mu RT}{\pi^3 \eta^2 N^2} \right)^{1/4}. \quad (14.5)$$

В настоящей работе коэффициент вязкости определяется методом затухающих крутильных колебаний диска. Если диск с массой m и радиусом a , подвешенный на тонкой упругой нити над таким же неподвижным диском, повернуть на некоторый угол, а потом отпустить, он начнет совершать крутильные колебания. Угол поворота диска можно определить с помощью зеркала Z (рис. 14.1). Колебания диска со временем затухают, что обусловлено главным образом действием сил внутреннего трения, возникающих в зазоре между дисками.

Определим момент сил трения. Выделим на диске кольцо, ограниченное радиусами r и $r+dr$. На это кольцо при колебаниях диска действует сила трения

$$df = \eta \frac{dv}{dz} ds = \eta \frac{r\dot{\varphi}}{d} 2\pi r dr,$$

где d — зазор между дисками; $\dot{\varphi}$ — угловая скорость диска.

Момент сил df равен

$$dM = r df = \frac{2\pi\eta r^3 \dot{\varphi}}{d} dr.$$

Полный момент сил трения, действующих на диск, определим интегрированием:

$$M_{\text{тр}} = \int dM = \frac{2\pi\gamma\dot{\varphi}}{d} \int_0^a r^3 dr = b\dot{\varphi}, \quad (14.6)$$

где $b = \frac{\pi\gamma a^4}{2d}$.

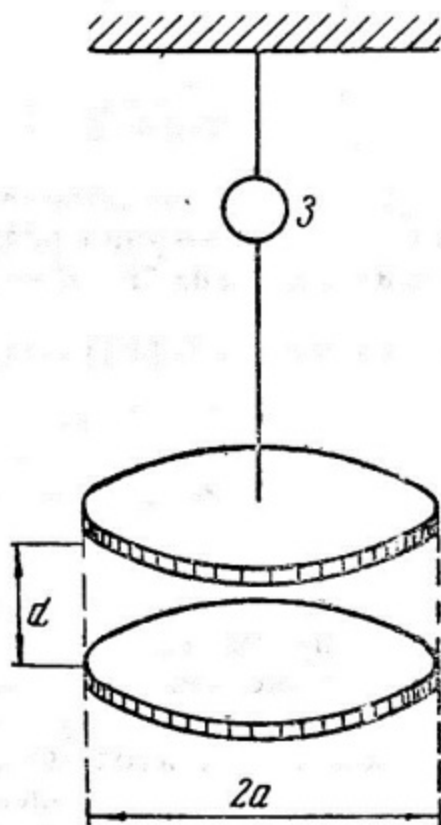


Рис. 14.1.

Написав уравнение динамики для движения диска, легко найти для коэффициента затухания колебаний значение

$$\beta = \frac{b}{2J}, \quad (14.7)$$

где $J = \frac{ma^2}{2}$ — момент инерции диска.

Сравнивая выражения (14.6) и (14.7), получаем формулу для расчета коэффициента вязкости η :

$$\eta = \frac{2md}{\pi a^2} \beta. \quad (14.8)$$

Коэффициент затухания β можно определить по методу, рассмотренному в работе 2, используя закон затухания амплитуды колебаний:

$$\varphi(t) = \varphi_0 e^{-\beta t}. \quad (14.9)$$

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Приборы и принадлежности: установка для исследования затухающих колебаний диска, соединенная с форвакуумным насосом и вакуумметром ВИТ-1, осветитель, секундомер.

Схема установки приведена на рис. 14.2. Цилиндрический стеклянный баллон 1 закрыт шлифом 2, на котором смонтировано крепление дисков. Для обеспечения постоян-

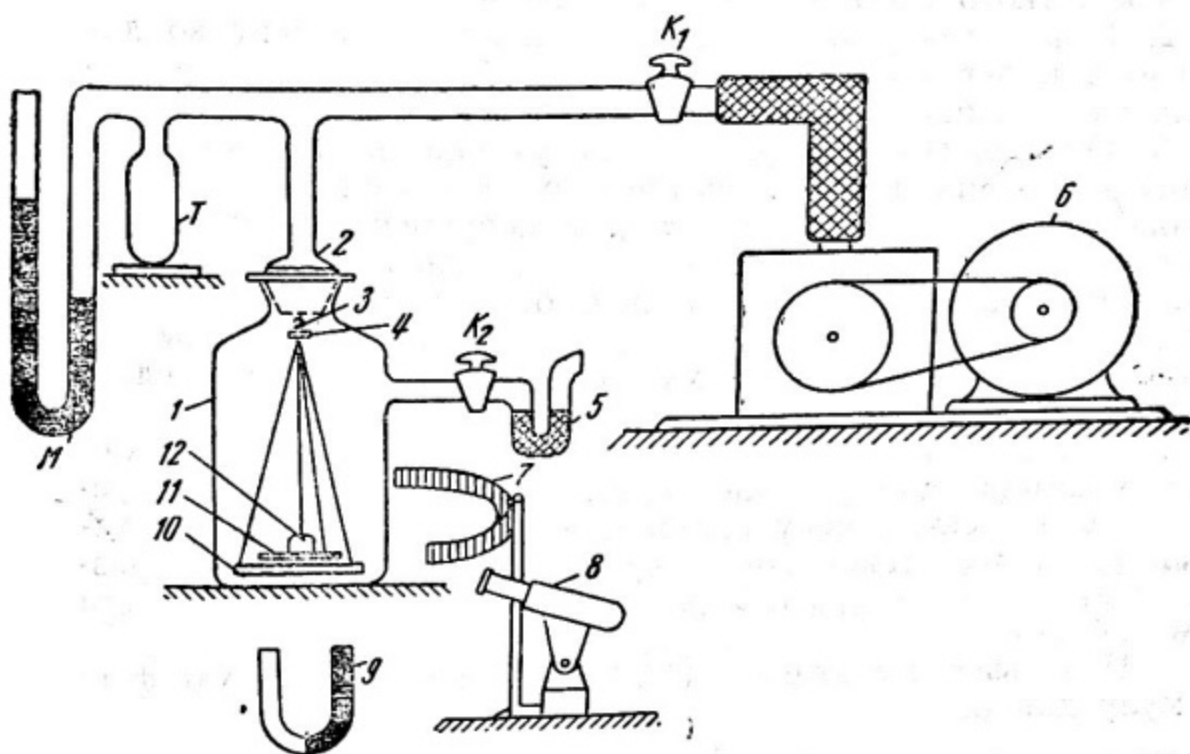


Рис. 14.2.

ного зазора оба диска подвешены к общему крючку 3. Верхний диск 11, снабженный зеркальцем 12, подвешен на упругой нити, длина которой может регулироваться. Нижний диск 10 подвешен на трех жестких стержнях к креплению 4. Отсчет угла поворота зеркальца производится с помощью проекции изображения щели осветителя 8 на матовой шка-

ле 7. Кран K_1 соединяет баллон с форвакуумным насосом (кран K_2 — с атмосферой).

Попадая в установку, атмосферный воздух предварительно проходит через осушитель 5. Давление в установке измеряется У-образным манометром M в пределах от 2 мм рт. ст. до атмосферного и термоманометром T — в пределах от 10^{-1} до 10^{-3} мм рт. ст. Из положения равновесия верхний диск выводится с помощью постоянного магнита 9. Время колебания диска измеряется секундомером.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Включить осветитель, направить луч на зеркало и добиться четкого изображения нити по шкале.

2. При атмосферном давлении поднести магнит ко дну баллона и легким вращением его сообщить начальные крутильные колебания верхнему диску.

3. Определить коэффициент затухания β . Для этого отсчитать деление шкалы, соответствующее амплитудному отклонению «зайчика» влево $\varphi_{0л}$, одновременно включив секундомер. Продолжая наблюдать за зайчиком, отсчитать деление шкалы, соответствующее отклонению вправо $\varphi_{0п}$. Приблизительно через 10 мин отсчитать деление шкалы, соответствующее амплитудному отклонению зайчика влево $\varphi_{тл}$, одновременно остановив секундомер. Затем, как и вначале, отсчитать деление шкалы, соответствующее последующему амплитудному отклонению зайчика вправо $\varphi_{тп}$. Определить по секундомеру время t , прошедшее между отсчетом $\varphi_{0л}$ и $\varphi_{тл}$ (такой же интервал времени, очевидно, разделяет отсчеты $\varphi_{0п}$ и $\varphi_{тп}$). Полученные данные занести в таблицу.

Используя выражение (14.9), получаем расчетную формулу для β :

$$\beta = \frac{1}{t} \ln \frac{\varphi_{0л} + \varphi_{0п}}{\varphi_{тл} + \varphi_{тп}}.$$

4. Закрыв кран K_2 и открыв кран K_1 , включить форвакуумный насос для откачки установки. Добиться максимального разрежения.

5. Произвести измерения согласно п. 3 при давлениях 10^{-2} , 10^{-1} , 50, 150, 450 мм рт. ст. Соответствующие давления устанавливаются постепенным натеканием воздуха в установку через кран K_2 .

Давление p , мм рт. ст.	10^{-2}	10^{-1}	50	100	150	450	$P_{\text{атм}}$
$\varphi_{\text{ол}}$							
$\varphi_{\text{оп}}$							
$\varphi_{\text{л}}$							
$\varphi_{\text{п}}$							
β							
η							

В случае необходимости можно в промежутках между измерениями, пользуясь магнитом, усилить колебания диска.

6. Вычислить по формуле (14.6) значения коэффициента вязкости воздуха.

7. Построить график зависимости η от p для всего интервала давлений. Отдельно построить график зависимости η от p для малых давлений.

8. Вычислить средний эффективный диаметр молекулы по формуле (14.5).

9. Определить ошибки измерений η и d .

Работа 15

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРА

ВВЕДЕНИЕ

Молекулы в поверхностном слое жидкости обладают избыточной потенциальной энергией по отношению к молекулам в объеме. Поэтому жидкость в целом обладает дополнительной потенциальной энергией, пропорциональной ее поверхности. Известно, что всякая механическая система имеет тенденцию перейти в состояние с минимальной потенциальной энергией. Следовательно, должна существовать сила, способная уменьшить площадь поверхности. Эта сила, приложенная к единице длины воображаемой границы раздела двух участков поверхности, называется коэффициентом поверхностного натяжения α . Сила поверхностного натяжения направлена по касательной к поверхности, перпендикулярно к границе раздела. Под действием поверхностного натяжения жидкость всегда сокращает свою поверхность до наименьшей величины. Можно показать, что поверхностная энергия, приходящаяся на единицу площади, численно равна силе, действующей на единицу длины.

Если поверхность жидкости искривлена, то ее тенденция к сокращению приведет к возникновению дополнительного давления Δp . Силы давления всегда направлены к центру кривизны. В пузырьках воздуха, находящихся внутри жид-

кости и имеющих сферическую форму, это давление может быть определено по формуле

$$\Delta p = \frac{2\alpha}{r}, \quad (15.1)$$

где r — радиус кривизны поверхности жидкости.

При поднятии жидкости в капиллярной трубке

$$\Delta p = \rho gh = \frac{2\alpha \cos \theta}{r},$$

где θ — краевой угол (угол смачивания); r — радиус капилляра; h — высота поднятия жидкости в капилляре; ρ — плотность жидкости. Приведенная формула позволяет определить высоту поднятия жидкости в капилляре:

$$h = \frac{2\alpha \cos \theta}{\rho gr}. \quad (15.2)$$

Коэффициент поверхностного натяжения зависит от температуры. Для большинства жидкостей поверхностное натяжение падает с температурой практически по закону

$$\alpha_t = \alpha_0 (1 - at), \quad (15.3)$$

где a — температурный коэффициент поверхностного натяжения. При критической температуре поверхностное натяжение становится равным нулю.

Значение коэффициента поверхностного натяжения растворов зависит от концентрации. Это связано с тем, что в поверхностном слое находятся молекулы как растворителя, так и растворенного вещества. Растворение в воде NaCl приводит к увеличению коэффициента поверхностного натяжения, который возрастает с увеличением концентрации.

Коэффициент поверхностного натяжения является одной из важных молекулярных постоянных. Для определения его величины предложены различные методы. К абсолютным методам относятся метод капиллярных трубок или параллельных пластинок, метод отрыва кольца или пластинки от поверхности жидкости и др. Из относительных методов наиболее широко используется метод определения α по избыточному давлению в воздушных пузырьках.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Приборы и принадлежности: два капилляра известных диаметров, штатив для их закрепления, сосуд с дистилли-

рованной водой, установка для определения поверхностного натяжения по методу воздушных пузырьков.

1. Коэффициент поверхностного натяжения можно определить по высоте поднятия жидкости в капиллярных трубках (рис. 15.1). Если h_1 — высота поднятия жидкости в труб-

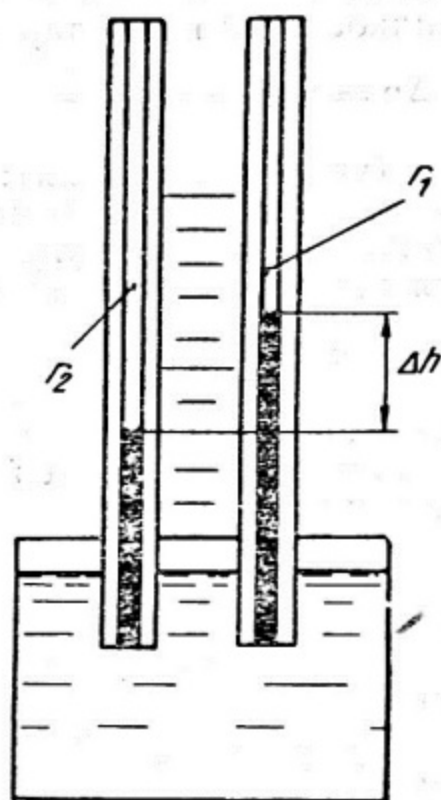


Рис. 15.1.

ке, радиус которой r_1 ; h_2 — высота поднятия той же жидкости в трубке с радиусом r_2 , то разность уровней капиллярного поднятия в двух трубках равна

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \frac{2\alpha \cos \theta (r_1 - r_2)}{\rho g r_1 r_2}.$$

Для воды $\cos \theta$ можно принять равным единице. Следовательно, измерив Δh и зная плотность воды ρ , а также радиусы трубок r_1 и r_2 , можно определить α :

$$\alpha = \frac{\rho g r_1 r_2 \Delta h}{2(r_1 - r_2)}. \quad (15.4)$$

2. Поверхностное натяжение жидкостей можно определить, измеряя избыточное давление в воздушных пузырь-

ках, выдавливаемых из узкого отверстия, опущенного под поверхность жидкости.

Установка для таких измерений изображена на рис. 15.2. Наполненный водой аспиратор А соединен резиновыми трубками с водяным U-образным манометром М и стеклянным баллоном Б, в который налита исследуемая жидкость. Через

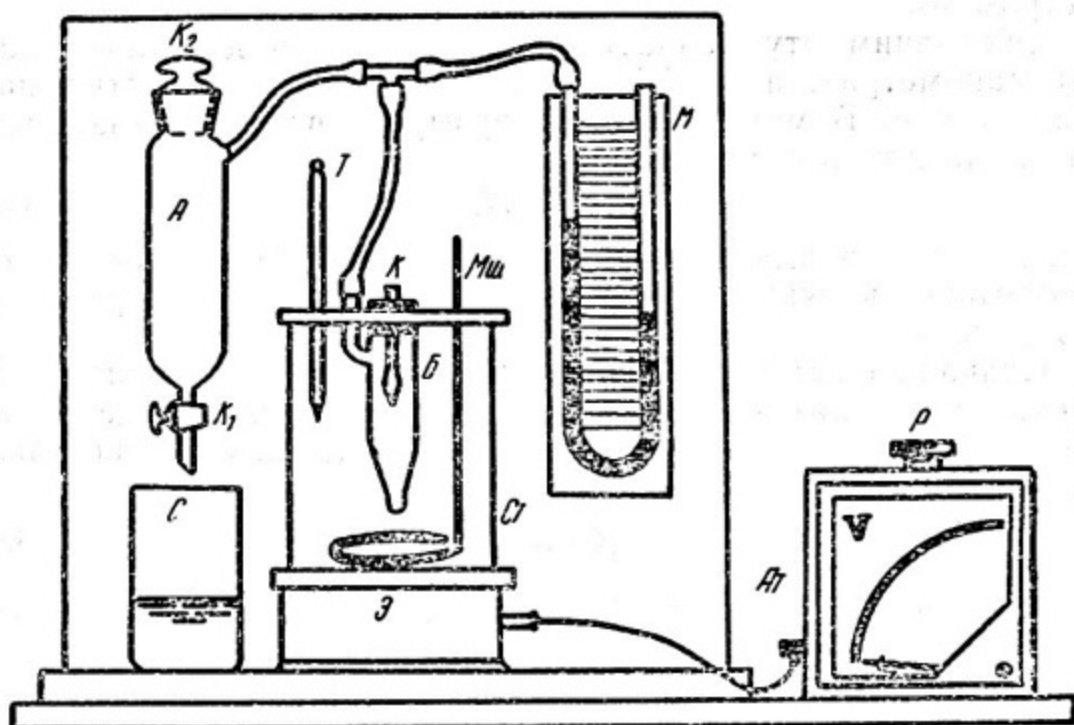


Рис. 15.2.

отверстие в пробке, плотно закрывающей баллон, введена стеклянная трубка К, суженный конец, которой касается поверхности жидкости.

Баллон с исследуемой жидкостью помещается в стакан с водой Ст, выполняющий роль термостата. Вода в стакане и жидкость в баллоне нагреваются на электроплитке Э, которая питается от автотрансформатора Ат. Напряжение на выходе автотрансформатора регулируется поворотом ручки Р, расположенной на его крышке. Температура исследуемой жидкости определяется по термометру Т, погруженному в стакан с водой, которая перемешивается мешалкой Мш.

Сверху аспиратор закрыт краном К₂. Если при закрытом верхнем кране К₂ слегка приоткрыть нижний кран К₁, то вода из аспиратора начнет медленно вытекать в сливной сосуд С и в установке возникнет разрежение. При понижении

давления над поверхностью исследуемой жидкости через кончик трубки начинает продавливаться пузырек воздуха. Отрыв пузырька воздуха наступает в тот момент, когда избыток атмосферного давления над давлением в баллоне Б станет равным давлению, обусловленному поверхностным натяжением в пузырьке. Это давление и измеряется манометром М.

Обозначим эту разность давлений H (в делениях шкалы манометра), а коэффициент поверхностного натяжения жидкости α . В момент отрыва пузырька воздуха оказывается справедливым соотношение

$$\alpha = AH, \quad (15.5)$$

где A — так называемая **постоянная прибора**, зависящая от геометрии кончика трубки и глубины ее погружения в жидкость.

Сначала опыт проводится с жидкостью, коэффициент поверхностного натяжения α_0 которой известен. Определяя из этого опыта соответствующее значение H_0 , находят постоянную прибора A :

$$A = \frac{\alpha_0}{H_0}. \quad (15.6)$$

Получив таким способом постоянную прибора, приступают к определению коэффициента поверхностного натяжения исследуемой жидкости, который согласно соотношениям (15.5) и (15.6) может быть выражен как

$$\alpha = \alpha_0 \frac{H}{H_0} = AH. \quad (15.7)$$

При этом необходимо наблюдать за тем, чтобы кончик погружался в обе жидкости — эталонную и исследуемую — одинаково.

ЗАДАНИЯ

1. Определение коэффициента поверхностного натяжения по поднятию жидкости в капиллярных трубках

1. Две капиллярные трубки известных диаметров, тщательно промытые, продуваются и устанавливаются в держатель штатива (см. рис. 15.1).

2. Установленные в штативе трубки несколько раз погружаются и извлекаются из исследуемой жидкости, после чего закрепляются. Проследить, чтобы в капиллярах не оставалось пузырьков воздуха. Правильность закрепления трубок проверить по отвесу.

3. По зеркальной шкале не менее пяти раз отмечается положение уровней жидкости h_1 и h_2 в капиллярах.

4. По разности уровней Δh и известным радиусам капилляров рассчитать коэффициент поверхностного натяжения по формуле (15.4) и оценить точность измерения.

2. Определение постоянной прибора

1. Прежде всего следует тщательно промыть водой и высушить баллон и трубку с кончиком.

Налить в баллон дистиллированную воду комнатной температуры примерно до уровня, указанного на рис. 15.2. Плотнo закрыть баллон пробкой со вставленной в нее трубкой К. Отрегулировать систему так, чтобы конец трубки К находился у поверхности воды, налитой в баллон.

2. Налив в стакан Ст воду комнатной температуры, собрать установку согласно схеме, приведенной на рис. 15.2. Открыть кран K_2 на атмосферу (или вовсе вынуть его из аспиратора) и еще раз отрегулировать положение трубки К так, чтобы ее обрез едва касался поверхности дистиллированной воды.

3. Вынув кран K_2 и закрыв кран K_1 , налить в аспиратор недистиллированную воду до уровня бокового отростка. Вставить кран K_2 на место, притерев его к горлышку, и, открыв кран K_2 , соединить установку с атмосферой. Вновь проверить и, если понадобится, отрегулировать положение трубки К.

4. Закрыв кран K_2 , открыть нижний кран K_1 аспиратора настолько, чтобы падение давления в установке при вытекании воды из аспиратора происходило достаточно медленно и можно было легко отсчитывать положения уровней воды в манометре в момент отрыва пузырьков.

Когда частота отрыва их станет примерно постоянной, провести отсчеты положений уровней воды в обоих коленах манометра. Отсчеты провести не менее чем для двадцати пузырьков (по десяти отсчетов для каждого колена). Определить по термометру температуру T_0 воды в стакане и записать ее.

5. По разности давлений H_0 и известному значению коэффициента α_0 воды при температуре T_0 определить постоянную прибора A , используя формулу (15.6), и оценить точность ее определения.

3. Исследование температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения воды

1. Включить через автотрансформатор электроплитку на слабый накал и, непрерывно размешивая мешалкой воду в стакане, нагреть ее примерно на 10°C . Уменьшив накал плитки настолько, чтобы температура воды оставалась на заданном уровне, провести измерения коэффициента поверхностного натяжения воды при этой температуре способом, изложенным в п. 4 предыдущего задания.

2. Нагревая воду до $80\text{--}90^{\circ}\text{C}$, производить подобные измерения через каждые 10°C , непрерывно и тщательно размешивая мешалкой воду в термостатирующем стакане. Окончив измерения, выключить автотрансформатор.

3. Рассчитать по формуле (15.7) значения коэффициента поверхностного натяжения воды при различных температурах.

4. Построить график температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения воды и из него определить температурный коэффициент ее поверхностного натяжения [коэффициент α в формуле (15.3)].

4. Исследование зависимости коэффициента поверхностного натяжения раствора соли от его концентрации

1. Вылить нагретую воду из термостатирующего стакана и наполнить его водой комнатной температуры. Промыть трубку с кончиком и высушить ее.

2. Налить в баллон раствор поваренной соли известной концентрации и провести измерения, как рекомендовано в п. 4 задания 2. Подобные измерения провести для четырех растворов с различной концентрацией соли.

С особой тщательностью необходимо следить за тем, чтобы установка кончика трубки во всех исследуемых растворах выдерживалась одинаковой с установкой его в задании 1. Невыполнение этого условия может привести к изменению постоянной прибора, определенной в задании 1, и к искажению результатов опыта.

4. По полученным данным, используя формулу (15.7), произвести расчеты и построить график зависимости коэффициента поверхностного натяжения раствора от его концентрации (при комнатной температуре).

5. Оценить точность измерений коэффициента поверхностного натяжения в заданиях 3 и 4.

Работа 16

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОРИСТЫХ ТЕЛ ПО ИЗОТЕРМЕ АДСОРБЦИИ

ВВЕДЕНИЕ

Как показывает опыт, даже тела, кажущиеся весьма гладкими, обладают в десятки раз большей истинной поверхностью, чем поверхность, вычисленная из геометрии тела. Величину истинной поверхности тела, отнесенную к его массе, называют удельной поверхностью. Особенно большой удельной поверхностью обладают сильноизмельченные и пористые тела.

К числу высокопористых тел относятся так называемый активированный (особым образом обработанный) древесный уголь и силикагель (частично обезвоженный гель кремниевой кислоты H_2SiO_3).

Истинная поверхность твердых тел может быть определена различными способами. Одним из сравнительно простых и наиболее надежных является метод адсорбции газов, который в последнее время находит все более широкое применение при физико-химических исследованиях.

Газы или пары, соприкасающиеся с твердым телом, частично им поглощаются. Это явление носит название сорбции. Поглощенные молекулы газа (пара) или проникают внутрь твердого тела, или удерживаются на его поверхности. Первое явление носит название абсорбции (или окклюзии), второе — адсорбции. В настоящей работе рассматривается только адсорбция.

Твердое тело, адсорбирующее газ или пар, называется адсорбентом. Большинство адсорбентов представляет собой высокопористые тела с исключительно большой внутренней поверхностью.

Явление адсорбции обусловлено наличием сил взаимодействия между атомами и молекулами. Молекула газа, приблизившись к поверхности твердого тела, попадает в сферу действия этих сил и может быть удержана вблизи поверхности.

Силы, удерживающие молекулы газа на поверхности твердого тела, могут иметь такую же природу, как силы, связывающие атомы в молекуле. В этом случае адсорбция носит название химической адсорбции или хемосорбции.

Если силы, обуславливающие взаимодействие между молекулами газа и адсорбентом, аналогичны силам взаимодействия между молекулами газа (силам Ван дер Ваальса), адсорбция называется физической. В дальнейшем речь идет лишь о физической адсорбции.

Силы Ван дер Ваальса очень быстро убывают с расстоянием, поэтому силовое поле адсорбента может удерживать только один слой газовых молекул, — происходит мономолекулярная адсорбция. Очень часто молекулы газа, адсорбированные на поверхности, способны адсорбировать второй слой молекул, который в свою очередь может адсорбировать третий слой и т. д. В результате поверхность адсорбента будет покрыта несколькими слоями молекул — наблюдается полимолекулярная адсорбция.

Поглощение газа адсорбентом может возникнуть в результате процесса, называемого капиллярной конденсацией. Упругость насыщенного пара над вогнутой поверхностью меньше, чем над плоской. Жидкость, смачивающая стенки, имеет в капиллярах вогнутую поверхность. В связи с этим в очень узких порах может происходить процесс конденсации пара при давлениях, значительно меньших упругости насыщенного пара над жидкостью в обычных условиях.

Таким образом, при адсорбции газов и паров твердыми телами наблюдаются мономолекулярная и полимолекулярная адсорбция и капиллярная конденсация.

Если адсорбент и какой-либо газ (пар) привести в соприкосновение при неизменных условиях, то установится равновесное состояние, отвечающее определенному количеству адсорбированного вещества. Количество газа, адсорбированное единицей массы адсорбента при установившемся равновесии, является функцией температуры, давления и природы адсорбента и адсорбированного вещества. В данном случае имеется в виду как химический состав адсор-

бента, так и его физическая структура: величина его поверхности, размеры и форма пор.

Для данного газа и адсорбента масса газа, адсорбированного при равновесии единицей массы адсорбента, является функцией только двух переменных — давления и температуры:

$$m_1 = f(p, T).$$

При неизменном давлении количество адсорбированного вещества сильно возрастает с понижением температуры. График зависимости

$$m_1 = f(T) \text{ при } p = \text{const}$$

называется изобарой адсорбции. На рис. 16.1 даны изобары адсорбции аммиака на древесном угле.

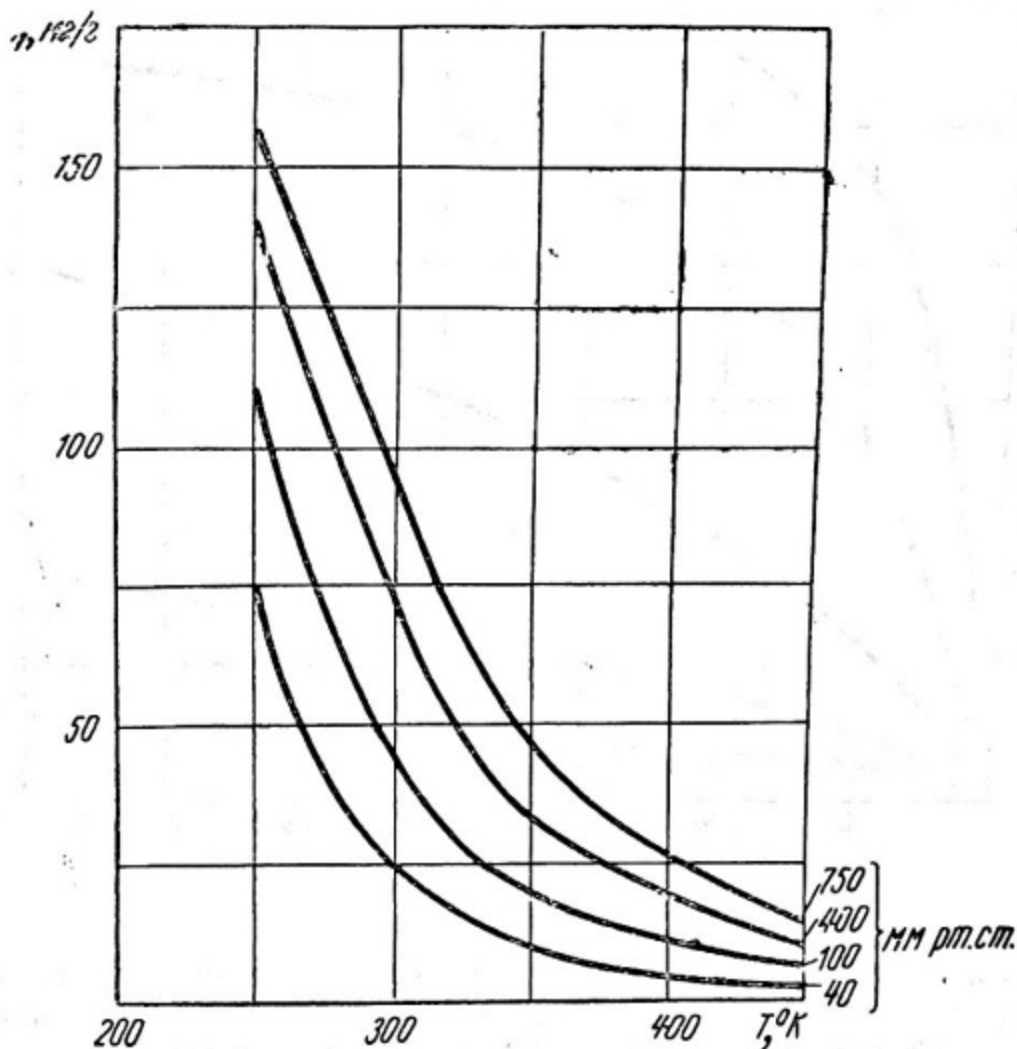


Рис. 16.1.

Кривая, изображающая зависимость количества адсорбированного вещества от давления при постоянной температуре, т. е. график функции

$$m_1 = f(p) \text{ при } T = \text{const}$$

носит название изотермы адсорбции.

На рис. 16.2 изображены изотермы адсорбции аммиака на угле. При малых давлениях количество адсорбированного вещества растет пропорционально давлению. Затем рост

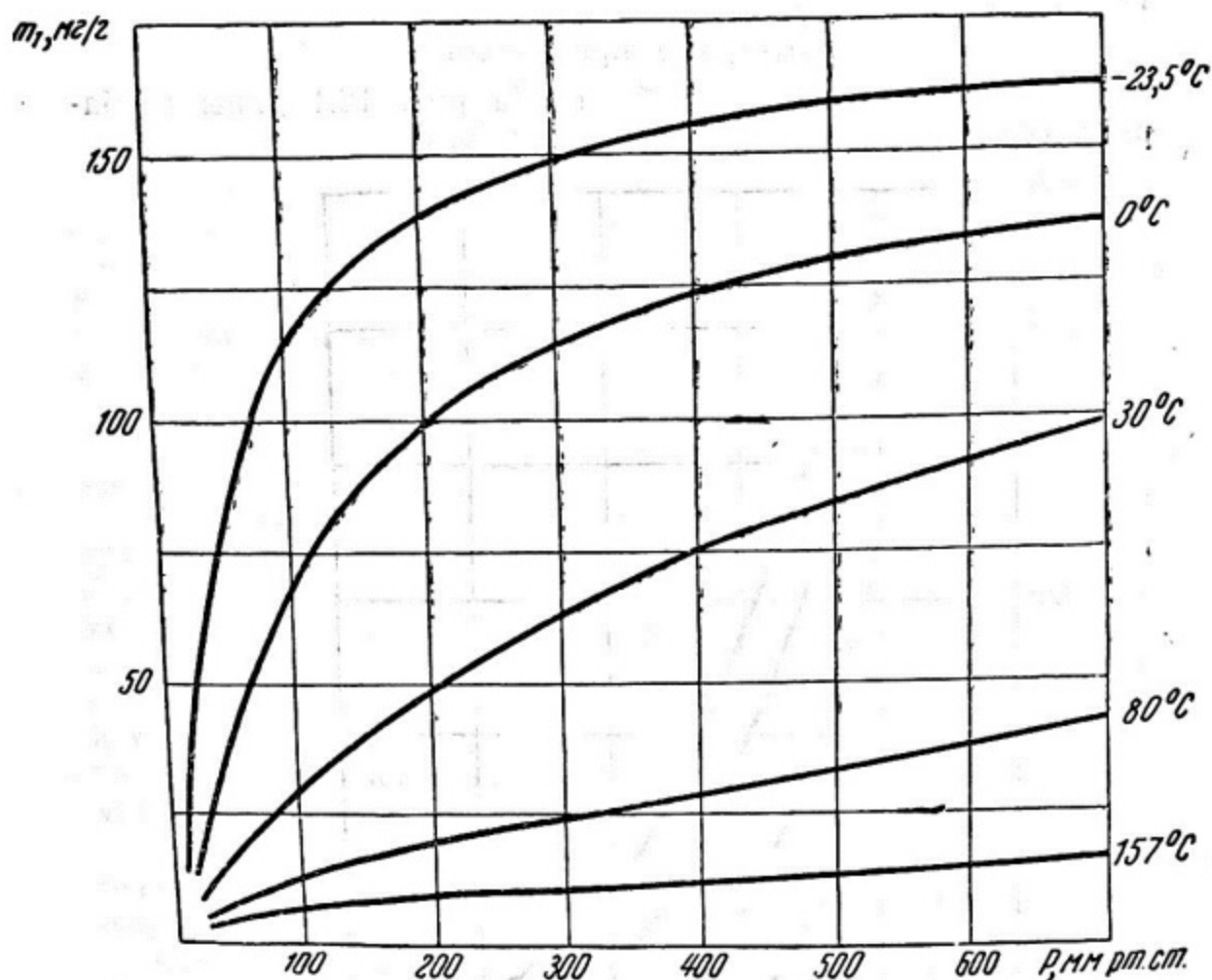


Рис. 16.2.

замедляется и при достаточно большом давлении (тем больше, чем выше температура) количество адсорбированного вещества перестает изменяться. Изотермы такого вида наблюдаются при мономолекулярной адсорбции.

Возрастание количества адсорбированного вещества прекращается после того, как вся поверхность адсорбента оказывается покрытой молекулами адсорбированного вещества.

Если удерживаемый адсорбентом слой молекул может в свою очередь адсорбировать данный газ (т. е. при полимолекулярной адсорбции), получаются так называемые S-образные изотермы (рис. 16.3). Подобные изотермы в об-

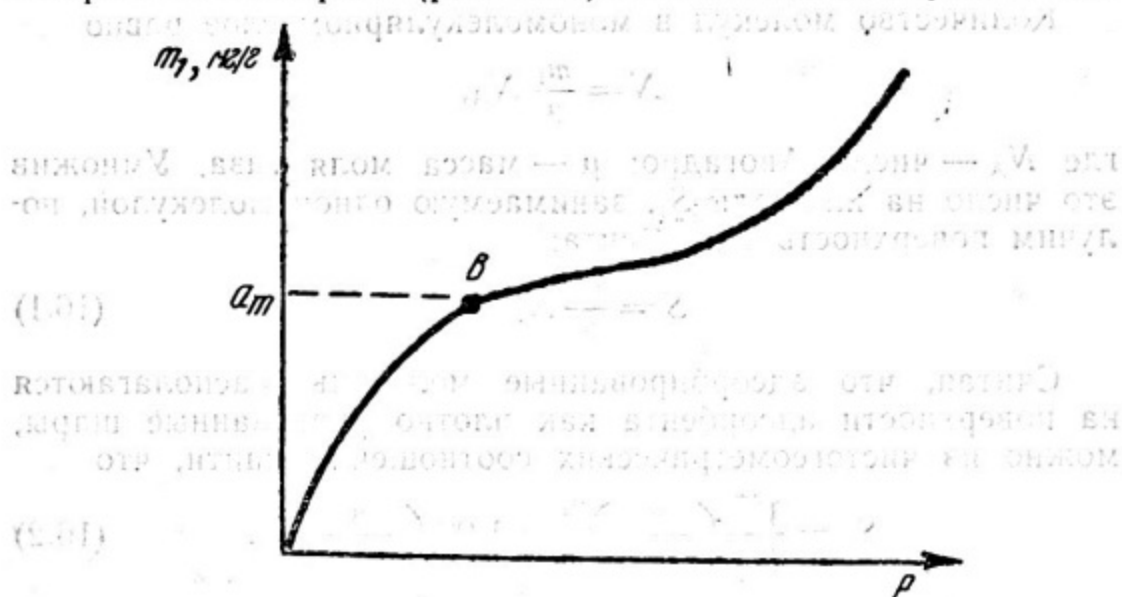


Рис. 16.3. S-образная изотерма адсорбции

ласти малых давлений выпуклы, в области высоких давлений вогнуты, а в промежуточной области характеризуются прямолинейным участком. В целом изотерма напоминает перевернутую букву S, чем и объясняется ее название.

Экспериментальные данные указывают на то, что покрытие адсорбента первым слоем молекул заканчивается в точке B, являющейся началом прямолинейного участка изотермы. Таким образом, сняв изотерму адсорбции и определив на ней положение точки B, можно найти массу газа, покрывающего одним слоем молекул всю поверхность адсорбента.

Площадь S_1 , занимаемую одной молекулой, можно вычислить исходя из предположения, что молекулы на поверхности адсорбента упакованы так же плотно, как в соответствующей жидкости или твердом теле.

В единице объема (1 см^3) жидкости или твердого тела содержится $\frac{\rho}{\mu} N_A$ молекул (ρ — плотность жидкости или

твердого тела). Следовательно, на одну молекулу приходится объем

$$V_1 = \frac{\mu}{\rho N_A}.$$

Площадь, занимаемая одной молекулой в поверхностном слое, очевидно, пропорциональна $V_1^{2/3}$.

Количество молекул в мономолекулярном слое равно

$$N = \frac{m_1}{\mu} N_A,$$

где N_A — число Авогадро; μ — масса моля газа. Умножив это число на площадь S_1 , занимаемую одной молекулой, получим поверхность адсорбента:

$$S = \frac{m_1}{\mu} N_A S_1. \quad (16.1)$$

Считая, что адсорбированные молекулы располагаются на поверхности адсорбента как плотно упакованные шары, можно из чистогеометрических соотношений найти, что

$$S_1 = \frac{V_1^{2/3}}{V_1^{1/3}} \left(\frac{\mu}{\rho N_A} \right)^{2/3} = 1,09 \left(\frac{\mu}{\rho N_A} \right)^{2/3}. \quad (16.2)$$

Окончательно удельная поверхность адсорбента вычисляется по формуле

$$S_{уд} = 1,09 \frac{m_1}{m_{ад}} \sqrt[3]{\frac{N_A}{\mu \rho^2}}, \quad (16.3)$$

где $m_{ад}$ — масса адсорбента.

Метод адсорбции является одним из самых точных, например, по адсорбции азота поверхность может быть определена с точностью до 20%.

Количество адсорбированного вещества определяют либо объемным методом, измеряя объем газа, поглощаемого адсорбентом, либо весовым методом, измеряя увеличение веса адсорбента. Весовой метод получил широкое распространение после того, как Мак-Бэн применил для исследования адсорбции пружинные весы (сорбционные весы Мак-Бэна). Мак-Бэн применял спиральную пружину из плавленного кварца, обладающего весьма высокими упругими свойствами (плавленный кварц замечателен отсутствием остаточных деформаций и ничтожным коэффициентом внутреннего

трения). В настоящей работе используется стальная пружина.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Приборы и принадлежности: установка для исследования процессов адсорбции (рис. 16.4) и катетометр КМ-6.

Установка схематически изображена на рис. 16.4. Она состоит из сорбционных весов, стеклянного баллона Б и U-образного ртутного манометра. Сорбционные весы представ-

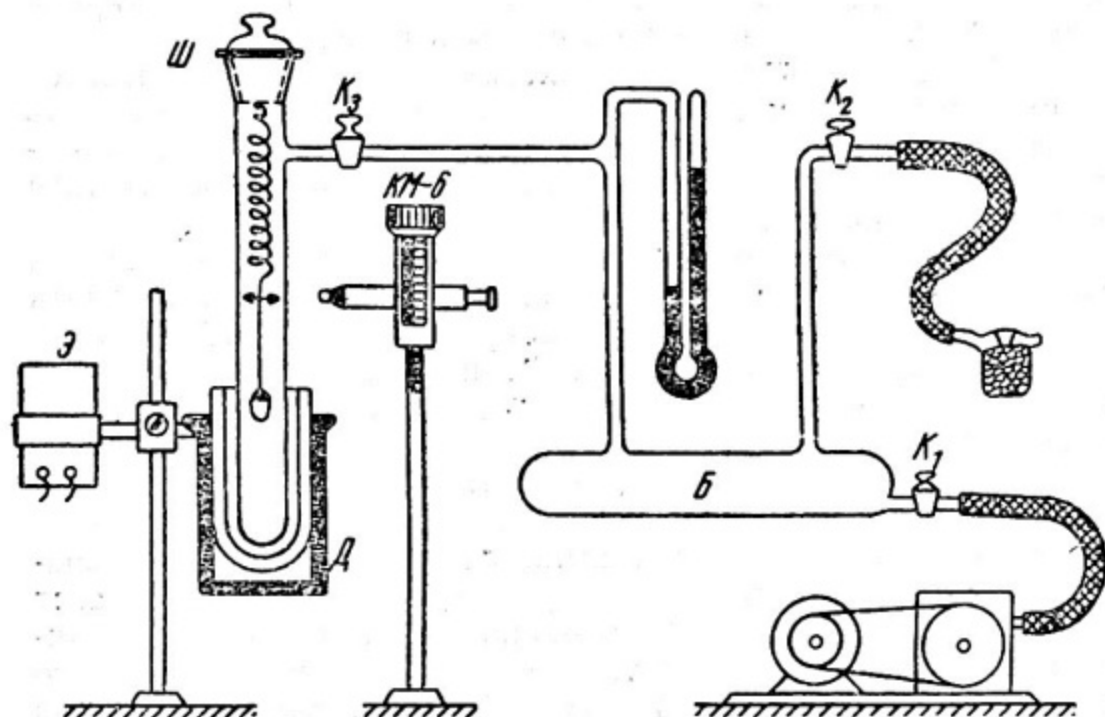


Рис. 16.4.

ляют собой длинную стеклянную трубку, закрывающуюся сверху стеклянным шлифом Ш. К шлифу прикреплена стальная пружина, к нижнему концу которой подвешена чашечка с адсорбентом. Растяжение пружины весов измеряется катетометром (см. приложение). Кран K_1 соединяет установку с форвакуумным насосом, кран K_2 — с атмосферой. Перед краном K_2 ставится склянка Тищенко, наполненная хлористым кальцием и служащая для осушения поступающего в установку воздуха. Кран K_3 соединяет сорбционные весы с баллоном Б.

Электрическая печь Э и подставка для сосуда Дьюара смонтированы на общей подставке, которая может перемещаться по вертикальной стойке.

Ртутный манометр позволяет измерять давление в вакуумной установке в пределах до 760 мм рт. ст.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Получив разрешение преподавателя или дежурного лаборанта, включить форвакуумный насос и спустя 1—2 мин поставить установку на откачку, для чего осторожно открыть краны K_3 и K_1 (кран K_2 должен быть перекрыт).

2. Когда ртуть в обоих коленах манометра установится примерно на одном уровне, надвинуть печь на нижнюю часть сорбционных весов, т. е. на участок трубки, где расположена чашечка с силикагелем. Закрепить печь на штативе и включить нагрев.

3. Продолжать откачивать установку при включенной печи не менее 30 мин. Это нужно для того, чтобы удалить с поверхности силикагеля адсорбированные на ней газы.

4. Перекрыть краны K_3 и K_1 , выключить печь и снять ее с трубки сорбционных весов. Выждать, пока стекло полностью охладится.

5. Налив немного жидкого азота в сосуд Дьюара, надвинуть его на нижнюю часть сорбционных весов так, чтобы чашечка с силикагелем была полностью закрыта дьюаром. Укрепить на штативе дьюар, долить в него жидкий азот почти доверху. По мере выкипания азота надо его подливать, следя за тем, чтобы уровень жидкости в течение всего эксперимента был у края сосуда Дьюара. Это в известной мере обеспечит постоянство температуры при снятии изотермы адсорбции.

6. Включить катетометр. Определить начальное положение указателя сорбционных весов.

7. При перекрытом кране K_3 , впустить в баллон установки через кран K_2 порцию воздуха из атмосферы. Открыв затем кран K_3 (при этом кран K_2 должен быть перекрыт), впустить воздух в трубку с силикагелем. Впуск воздуха в установку надо производить осторожно, слегка приоткрывая кран K_2 , и малыми порциями, чтобы после начальной адсорбции давление в установке не превышало 20—30 мм рт. ст.

Примечание. Следует учесть, что в результате адсорбции давление уменьшается примерно на 10 мм рт. ст. Если

в баллон впущена большая порция воздуха, то до открытия крана K_3 следует откачать воздух из баллона насосом.

8. Измерить равновесное давление и соответствующее ему положение указателя сорбционных весов. Перед снятием отсчета следует выждать (примерно 10 мин), когда давление в установке и показание весов перестанут изменяться. Провести подобные измерения, постепенно увеличивая давление в установке. По мере приближения к точке B на изотерме адсорбции следует уменьшить интервалы изменения давления (до 10—20 мм рт. ст.), чтобы наиболее точно определить момент окончания процесса мономолекулярной адсорбции. Для этого одновременно с записью наблюдений нужно строить график зависимости положения указателя сорбционных весов от давления на заранее заготовленном листе миллиметровой бумаги.

9. Провести 3—4 измерения и после окончания мономолекулярной адсорбции. На графике они расположатся на прямолинейном и вогнутом участках изотермы.

10. Окончив измерения, открыть краны K_3 и K_1 и, сняв сосуд Дьюара с трубки сорбционных весов, откачивать установку, пока не будет удален десорбированный с поверхности силикагеля воздух. После этого, закрыв кран K_1 и выключив форвакуумный насос, подать в установку воздух, открыв кран K_2 .

Ни в коем случае нельзя, закончив измерения, оставлять при выключенном форвакуумном насосе закрытыми краны K_3 и K_2 , так как давление в установке вследствие десорбции воздуха может превысить атмосферное, в результате чего краны могут вылететь и установка выйдет из строя.

11. Зная коэффициент упругости пружины сорбционных весов и цену деления шкалы катетометра, из графика зависимости положения указателя сорбционных весов от давления определить массу воздуха m_1 , адсорбированного на поверхности силикагеля в виде мономолекулярного слоя.

По массе адсорбента и значению плотности жидкого воздуха рассчитать удельную поверхность силикагеля.

12. Оценить погрешность выполненных измерений и полученного значения удельной поверхности.

КАТЕТОМЕТР

ПРИЛОЖЕНИЕ

Катетометр КМ-6 предназначен для измерения вертикальных отрезков на недоступных для непосредственного измере-

ния объектах, расположенных на расстояниях нескольких десятков сантиметров от объектива зрительной трубы катетометра.

Катетометр (рис. 16.5) состоит из вертикального штатива с колонкой 1 на треножнике, измерительной каретки 2, зрительной трубы 3 и отсчетного микроскопа 4. Подъемными

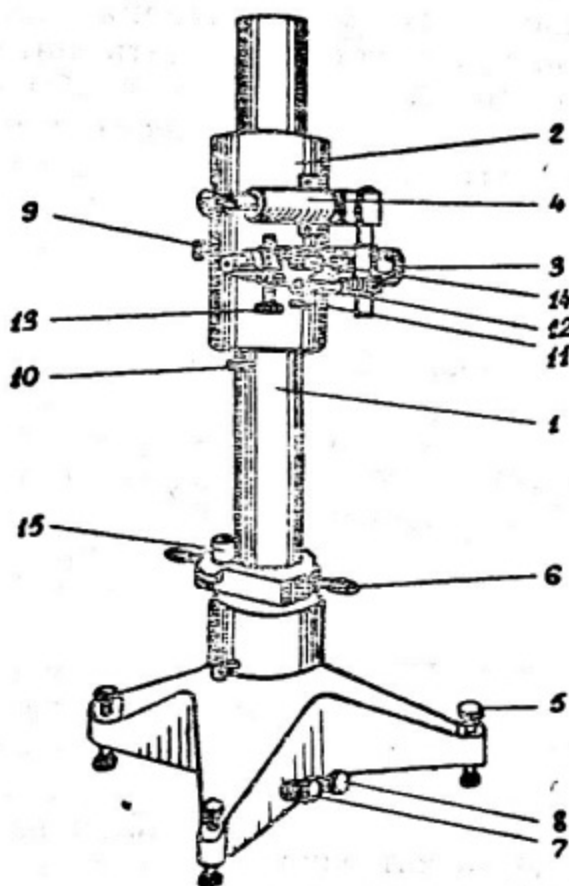


Рис. 16.5.

винтами 5 треножника колонку можно устанавливать по круглому уровню 15 строго вертикально. С помощью ручек 6 колонку можно поворачивать вокруг вертикальной оси. Для точной наводки поворот колонки осуществляется микрометрическим винтом 7 при закрепленном винте 8.

Измерительная каретка 2, несущая зрительную трубу 3 и отсчетный микроскоп 4, перемещается по колонке на роликах. Грубое перемещение каретки по вертикали осуществляется от руки при открепленном винте 9, точное — с помощью микрометрического винта 10 при закрепленном винте 9.

Зрительная труба 3 укреплена на каретке. Фокусировка трубы на выбранную точку объекта производится вращением маховичка 11, грубая наводка осуществляется с помощью механического визира, состоящего из целика и мушки, укрепленных на тубусе зрительной трубы. Сбоку на тубусе имеется цилиндрический уровень 12, ось которого параллельна визирной оси трубы. Уровень устанавливается в горизонтальное положение микрометрическим винтом 13 путем совмещения изображения концов пузырька, рассматриваемого через лупу 14. При совмещенных половинках пузырька визирная ось зрительной трубы принимает строго горизонтальное положение. Точная наводка зрительной трубы в горизонтальной плоскости производится поворотом колонки микрометрическим винтом 7 при закрепленном винте 8.

Измерительная система катетометра состоит из зрительной трубы и отсчетного микроскопа с осветительной системой. В фокальной плоскости окуляра отсчетного микроскопа установлена масштабная сетка (рис. 16.6), на которую специаль-

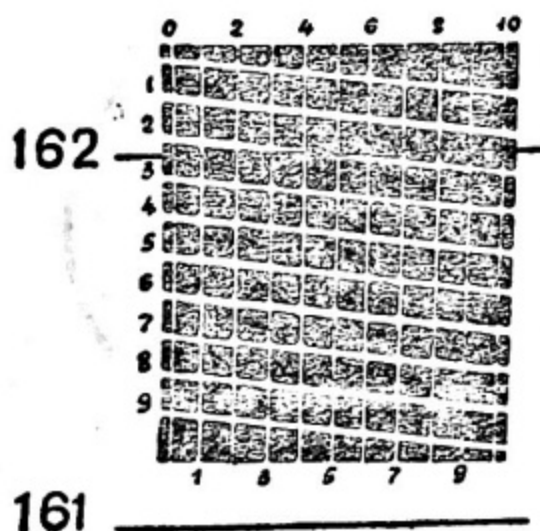


Рис. 16.6.

ным оптическим устройством проектируется миллиметровая шкала. Измерение расстояний между двумя точками производится с помощью зрительной трубы и отсчетного микроскопа путем сравнения измеряемой длины с миллиметровой шкалой.

Перемещая каретку со зрительной трубой и отсчетным микроскопом по колонке вдоль миллиметровой шкалы, а также вращая колонку вокруг вертикальной оси, устанавливают трубу на выбранные точки объекта; отсчеты снимают через окуляр отсчетного микроскопа по шкале и масштабной сетке. Длины вертикальных отрезков определяют как разность соответствующих отсчетов по шкале.

Катетометр снабжен набором сменных насадочных линз. На объектив зрительной трубы надевается та или иная линза в зависимости от расстояния от объекта до измеряемого предмета. Расстояния указаны на оправках линз. Катетометр снабжен также трансформатором для включения в сеть осветительной части отсчетного микроскопа.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Ориентировочно определяется расстояние между объективом зрительной трубы и объектом измерения. На объектив надевается соответствующая насадочная линза. С помощью

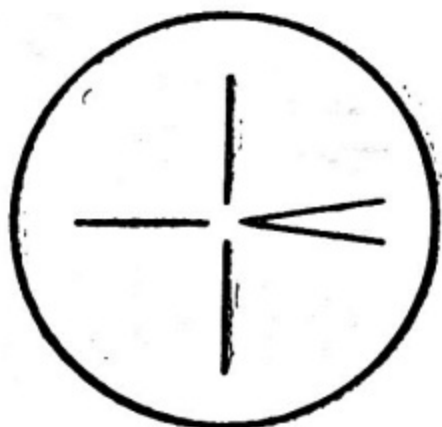


Рис. 16.7.

подъемных винтов треножника по круглому уровню ось колонки устанавливается строго вертикально.

Осветительная часть отсчетного микроскопа включается через трансформатор в сеть.

Винт 9 открепляется, измерительная каретка поднимается на уровень выбранной точки объекта. С помощью целика и мушки труба грубо устанавливается на выбранную точку. Окуляр зрительной трубы вращением устанавливается на резкое изображение сетки; фокусировка трубы на резкое изображение объекта производится вращением маховичка 11.

После этого производится точная наводка трубы на выбранную точку объекта: в вертикальной плоскости с помощью винта 10 при закрепленном винте 9, в горизонтальной плоскости с помощью винта 7 при закрепленном винте 8.

Сетка зрительной трубы имеет перекрестие (рис. 16.7), правый горизонтальный штрих которого выполнен в виде углового биссектора. При наводке трубы выбранная точка объекта должна располагаться в правой половине углового биссектора на уровне горизонтального штриха. При этом необходимо следить за цилиндрическим уровнем 12, изображения половинок пузырька которого должны образовывать дугу.

После этого снимают первый отсчет по масштабной сетке. Затем, перемещая каретку по колонке, наводят зрительную трубу на вторую точку измеряемого объекта и, проверив установку по цилиндрическому уровню, снимают второй отсчет. Разность между двумя отсчетами даст измеренную величину отрезка.

В поле зрения отсчетного микроскопа одновременно видны изображения двух штрихов миллиметровой шкалы, обозначенные крупными цифрами, и масштабная сетка (см. рис. 16.6).

Производство отсчета легко уяснить из следующего примера. На рис. 16.6 большой штрих располагается на масштабной сетке. Целое число миллиметров определяется большой цифрой, соответствующей этому штриху, десятые доли миллиметров — ближайшей цифрой слева над штрихом. Отсчет сотых и тысячных долей миллиметра производится в горизонтальном направлении сетки там, где миллиметровый штрих шкалы пересекает наклонные светлые линии. На рис. 16.6 миллиметровый штрих 162 находится под цифрой 2 и между четвертым и пятым делениями сетки. Отсчет составит 62,244 мм. Тысячные доли миллиметра отсчитываются на глаз по положению штриха между вертикальными делениями сетки.

Следует отметить, что в процессе измерений данного отрезка азимутальная наводка трубы (т. е. наводка трубы в горизонтальной плоскости) не должна меняться.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Методические указания	4
Правила построения и обработки графиков	6
Работа 1. Применение электронного осциллографа к исследованию колебаний звуковой частоты	14
Работа 2. Изучение затухающих колебаний физического маятника	26
Работа 3. Изучение вынужденных колебаний с помощью маятника поля	31
Работа 4. Исследование собственных колебаний струны методом резонанса	36
Работа 5. Определение скорости звука в твердых телах и модуля упругости Юнга методом резонанса	43
Работа 6. Определение скорости звука в воздухе и отношения C_p/C_V методом акустического резонанса	49
Работа 7. Методы измерения температуры	53
Работа 8. Определение термического коэффициента давления газа с помощью газового термометра	64
Работа 9. Определение термического коэффициента линейного расширения тел с помощью оптиметра	68
Работа 10. Определение отношения C_p/C_V для воздуха методом Клемана — Дезорма	78
Работа 11. Изучение броуновского движения взвешенных частиц	85
Работа 12. Получение и измерение вакуума	93
Работа 13. Определение коэффициента вязкости воздуха методом истечения из капилляра	107
Работа 14. Определение коэффициента вязкости воздуха по колебаниям диска	112
Работа 15. Исследование зависимости коэффициента поверхностного натяжения от температуры и концентрации раствора	118
Работа 16. Определение удельной поверхности пористых тел по изотерме адсорбции	125
