ТАЛЛИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Г. А. МЕТС, И. Х. МЕЙТРЕ и Л. А. ЮУЛЬ

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ФИЗИКЕ

I

Таллин 1984

Таллинский политехн. институт

1 X
А-7983

ТАЛЛИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Кафедра физики

Г. А. МЕТС, И. Х. МЕЙТРЕ и Л. А. ЮУЛЬ

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ФИЗИКЕ

I

Таллин 1964

Tartu Riikliku Ülikooli
Raamatukogu
186022

Краткие сведения из теории весов

Рычажные весы имеют рычаг (коромысло), опирающийся на призму K_1 (рис. 1). На концах рычага, на призмах КК, висят чашки РР. Ребра призм K_1 и КК находятся в одной горизонтальной плоскости. Такая установка упрощает теорию весов, так как такие весы при повороте коромысла имеют постоянное отношение плеч, чего нет в случае, если призмы не расположены в одной плоскости.

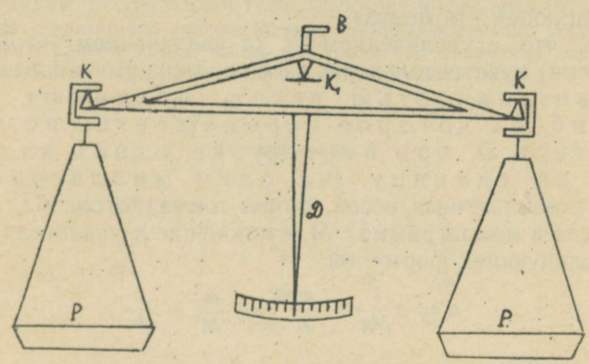


Рис. 1

Центр тяжести подвижной части весов (коромысла) всегда располагается несколько ниже точки опоры рычага (коромысла), что обеспечивает устойчивое равновесие. Расстояние от точки опоры (ребро призмы K_1) до центра тяжести коромысла обозначим h (рис. 2), массу коромысла — M; тогда «возвращающий момент» P при отклонении коромысла на угол α будет иметь следующее выражение: $P = Mgh \sin \alpha$.

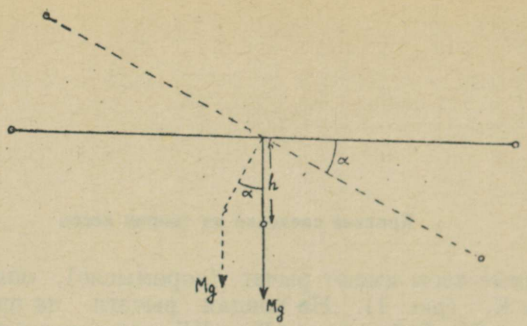


Рис. 2

Из этого выражения видно, что «возвращающий момент» пропорционален h. Перемещением гайки В по винту (рис. 1) вниз или вверх можно переместить центр тяжести и, следовательно, изменить величину h, а значит, изменить величину «возвращающего момента».

Ясно, что с увеличением h, (с увеличением устойчивости равновесия) чувствительность весов должна уменьшаться. Под чувствительностью весов понимают число делений, на которое перемещается по шкале указатель D при перегрузке одной из чашек весов на единицу (на один миллиграмм).

Для равноплечных весов, длина плеча которых l, а масса коромысла в миллиграммах M, отклонение n указателя определяется следующей формулой:

$$n = c\frac{l}{Mg} \cdot \frac{mg}{h} = c\frac{m}{M} \cdot \frac{l}{h},$$

где c — коэффициент пропорциональности и m — масса перегрузки. Положив $m=1$ (например 1 мг), получим для чувствительности следующее выражение:

$$\tau = c\frac{l}{Mh}$$

Из формулы видно, что чувствительность весов прямо пропорциональна отношению длины плеча к массе коромысла: $\frac{l}{M}$ и обратно пропорциональна h.

Рейтер. Рейтер — это приспособление, которое дает возможность производить нагрузку весов с точностью до 1 мг, не пользуясь слишком мелкими разновесками.

Каждая половина коромысла разделена на 10 равных частей (рис. 3). На коромысло вешается проволочная петелька, называемая «рейтером», вес которой равен 10 мг (0,010 г). Если рейтер висит посредине коромысла (на нулевом делении), то он не может вызвать поворота коромысла. Если рейтер перенести на первое деление, то на соответствующем плече коро-

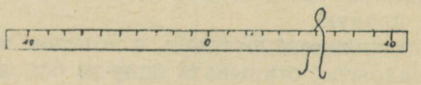


Рис. 3

мысла, по закону рычагов, будет действовать момент, эквивалентный моменту, который получился бы при нагрузке чашки всего одним миллиграммом. На десятом делении рейтер дает нагрузку, равную полному его весу — 10 мг. На других делениях мы будем получать соответствующее число миллиграммов.

Арретир. Арретир это приспособление, которое поднимает коромысло и чашки весов с граней призм, чтобы эти грани под давлением не испортились. Рукоятка арретира расположена в нижней части весов.

Шкала весов

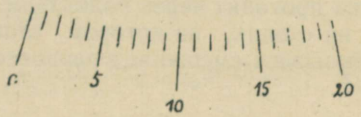


Рис. 4

Шкала весов, перед которой движется стрелка, имеет 20 делений, по которым отсчитывают местоположения стрелки. При этом считают крайний левый штрих нулевым штрихом, средний — десятым, и крайний правый штрих двадцатым (рис. 4). Десятые же доли между двумя соседними штрихами следует оценивать на глаз.

* * *

Высокая чувствительность так называемых «аналитических весов», которыми пользуются при точных лабораторных работах, требует бережного и внимательного отношения к ним. Поэтому, прежде чем приступить к работе, следует тщательно изучать правила взвешивания.

Правила взвешивания

1. Не касайтесь руками коромысла и чашек весов, так как всякое загрязнение ведет к неточности взвешивания.

2. На чашки весов не ложите ничего грязного, мокрого и горячего.

3. Взвешиваемое тело помещайте на левую чашку весов, а разновески на правую.

4. Дверцы стеклянного футляра, в котором находятся весы, должны быть закрыты; открывать одну из боковых дверец следует только при надобности. Переднюю стенку студент вообще не должен открывать.

5. Не накладывайте на чашки грузов, превышающих «предельную нагрузку», т. е. 200 граммов в нашем случае.

6. При взвешивании следует сидеть прямо против весов, а не сбоку. Отсчеты амплитуд колебаний делаются одним глазом, располагая глаз точно в середине весов. Это делается во избежание ошибки параллакса.

7. Разновески берите только пинцетами.

8. Снимаемые с весов разновески никогда не кладите на стол, а только обратно на свое место в ящик.

9. Весы должны быть всегда арретированы; отпускается арретир только на время производства отсчетов.

Арретировать следует очень спокойно и плавно в тот момент, когда стрелка проходит через положение равновесия.

10. Опираться на столик, на котором стоят весы не полагается, т. к. это вызывает смещение равновесного положения весов.

Первая работа с аналитическими весами

I-ое упражнение

Определение нулевой точки

Имея представление об аналитических весах и зная как обращаться с ними, мы можем приступить к самим упражнениям с такими весами.

Первое упражнение состоит в определении нулевой точки весов. Нулевая точка есть точка на шкале весов, соответствующая равновесному положению ненагруженных весов, около которой будет колебаться стрелка освобожденных от арретира весов.

Эту точку определяют из наблюдений над колебаниями

стрелки весов. Колебания эти затухающие — это значит, что амплитуда колебания постоянно уменьшается.

Представим себе схематически (рис. 5) такие колебания.

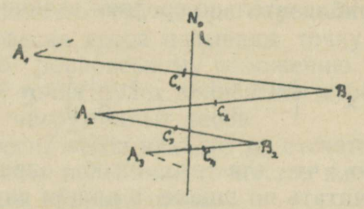


Рис. 5

На рисунке A_1, A_2, A_3 представляют точки поворота стрелки по левую сторону от нулевой линии, B_1, B_2 — по правую сторону от этой линии, а C_1, C_2 и т. д. — это средние точки между A_1 и B_1 B_1 и A_2 и т. д.

Пусть отсчеты по шкале, соответствующие точкам A_1, A_2, A_3 будут a_1, a_2, a_3, — точками B_1, B_2 будут b_1, b_2; тогда мы можем вычислить показания шкалы для точек C_1, C_2, C_3 и т. д. Если эти показания, как неизвестные, обозначим через X_1, X_2, X_3 и т. д., тогда получим:

$$x_1 = \frac{a_1 + b_1}{2}; \quad x_2 = \frac{a_2 + b_1}{2}; \quad x_3 = \frac{a_2 + b_2}{2}; \quad x_4 = \frac{a_3 + b_2}{2}. \qquad (1)$$

Среднее арифметическое же значение x_1, x_2, x_3, x_4 очевидно дает нам показание x на шкале, что соответствует нулевой точке. Итак:

$$x = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4}{4}.$$

Подставим сюда значения x_1, x_2, ... из (1) и проделаем необходимые преобразования:

$$x = \frac{a_1 + b_1 + a_2 + b_1 + a_2 + b_2 + a_3 + b_2}{2 \cdot 4} = \frac{a_1 + 2a_2 + a_3 + 2b_1 + 2b_2}{2 \cdot 4} =$$

$$= \left(\frac{a_1 + 2a_2 + a_3}{4} + \frac{b_1 + b_2}{2} \right) : 2.$$

Если тут еще обратить внимание на то, что без большой ошибки можно в данном случае писать:

$$\frac{a_1+2a_2+a_3}{4}=\frac{a_1+a_2+a_3}{3},$$

так как a_2 есть приблизительно средняя величина между a_1 и a_3, то получим:

$$x=\left(\frac{a_1+a_2+a_3}{3}+\frac{b_1+b_2}{2}\right):2.$$

А отсюда ясно, что для того, чтобы определить нулевую точку, нужно отсчитать по шкале, в нашем случае в продолжении двух полных колебаний, положения точек поворота стрелки. При этом, если условимся, как обыкновенно принято, брать первый отсчет с левой стороны, тогда получим всего три отсчета по левой стороне и два — по правой. Дальше следует взять среднее арифметическое левых отсчетов и также правых отсчетов. Наконец надо еще найти среднее арифметическое двух последних величин, что и дает положение нулевой точки.

Отсчеты и вычисления регистрируем по следующему примеру:

Левые	Правые
8,9	11,2
9,0	11,1
9,1	
27,0 : 3=9,00	22,3 : 2=11,15

Итак, нулевая точка $N_0=\frac{9,00+11,15}{2}=10,1$.

При отсчете точек поворота стрелки нужно обратить внимание на то, что амплитуда колебания не должна быть слишком велика. Считается желательным ограничить амплитуду между 2—3 делениями шкалы. Если, освободив весы, амплитуда колебания получается слишком велика, тогда надо весы снова арретировать и снова медленно освободить.

Нулевую точку следует определить 3 раза и взять наконец среднее значение.

Если нулевая точка отклоняется от 10-го деления в одну или другую сторону больше чем на 1,0 деление, то это значит, что весы не в порядке. Об этом необходимо сразу же сообщить дежурному преподавателю.

II-е упражнение

Определение чувствительности весов

Выше было дано понятие чувствительности весов. Остается только дать указание о том, как ее определить.

Точкой равновесия весов называют точку на шкале весов, соответствующую равновесному положению нагруженных весов. Около этой точки будет колебаться стрелка освобожденных от арретира нагруженных весов.

Точку равновесия весов находят из отсчетов точек поворота стрелки двух полных колебаний точно так же, как мы это делали при нахождении нулевой точки.

Определяем чувствительность тех весов, нулевую точку которых мы только что нашли. Для этого перегрузим рейтером весы несколькими миллиграммами и определим точку равновесия. Если обозначить точку равновесия через N_p, где индекс p означает число миллиграммов перегрузки, то чувствительность весов вычисляется по формуле

$$\tau_0 = \frac{N_p - N_0}{p}.$$

Наименование единицы чувствительности весов по ее смыслу должно быть число делений на миллиграмм: $\frac{\text{дел}}{\text{мг}}$.

Найдите чувствительность, взяв p=2, 3 и 4 и возьмите потом среднее арифметическое из них.

III-е упражнение

Нахождение веса легкого тела

Под выражением «легкое тело» подразумевается тело, вес которого можно определить, не пользуясь разновесками, а только определив нулевую точку (N_0), чувствительность (τ_0) и точку равновесия весов ($N_г$) в случае перегрузки их этим легким телом.

Рассуждаем так: при перегрузке весов одним миллиграммом точка равновесия переместится на τ_0 делений, при перегрузке же весов легким телом, точка равновесия переместилась на

$N_т - N_0$ делений. Значит сколько раз τ_0 содержится в $N_т - N_0$, столько миллиграммов будет весить легкое тело:

$$x = \frac{N_т - N_0}{\tau_0}.$$

Легкое тело, вес которого придется определить, попросите у ассистента.

В начале и в конце этого упражнения надо найти нулевую точку и для вычисления брать среднее значение их, в случае если их значения не расходятся больше чем на 0,2 деления шкалы. В противном случае надо обратиться к дежурному преподавателю (ассистенту).

Результаты упражнений следует внести в следующие таблицы:

Весы № .....

I. Определение нулевых точек
(Должны укладываться в пределы 9,0—11,0)

Лев.	Прав.	Лев.	Прав.	Лев.	Прав.
.....	.....	.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....	.....	.....
.....		.....		.....	
(Средн.)	(Средн.)	(Средн.)	(Средн.)	(Средн.)	(Средн.)
N_0=.....		N_0=.....		N_0=.....	

(с точностью до 0,1)

Среднее = ... (с точн. до 0,1)

II. Определение точки равновесия весов, нагруженных рейтером
(брать нагрузки p=2, 3, 4 мг)

p=2 мг		p=3 мг		p=4 мг	
Лев.	Прав.	Лев.	Прав.	Лев.	Прав.
.....	.....	.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....	.....	.....
.....		.....		.....	
(Средн.)	(Средн.)	(Средн.)	(Средн.)	(Средн.)	(Средн.)
N_2=.....		N_3=.....		N_4=.....	

(С точн. 0,1)

III. Вычисление чувствительности весов τ_0

1) $\tau_0 = \frac{N_0 - N_2}{2}$ 2) $\tau_0 = \frac{N_0 - N_3}{3}$ 3) $\tau_0 = \frac{N_0 - N_4}{4}$

Среднее $\tau_0 = \ldots\ldots$ (точн. 0,1)

Примечание: Если $N_p > N_0$, то вычесть N_0 из N_p.

IV. Определение точки равновесия весов нагруженных легким телом

Лев.	Прав.	Лев.	Прав.	Лев.	Прав.
. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
. . . . .		. . . . .		. . . . .	
(Средн.)	(Средн.)	(Средн.)	(Средн.)	(Средн.)	(Средн.)
$N = \ldots\ldots$		$N = \ldots\ldots$		$N = \ldots\ldots$	

Среднее $N = \ldots\ldots$ (точн. 0,1)

V. Вычисление веса легкого тела

$$x = \frac{N_т - N_0}{\tau_0} \text{ мг. (точность 0,1)}$$

Примечание: 1) Если $N_0 > N_т$, то брать $N_0 - N_т$.
2) Поставив единицы в последнюю формулу, показать, что результат будет в миллиграммах.

VI. Контроль нулевой точки

Лев.	Прав.
. . . . .	. . . . .
. . . . .	. . . . .
. . . . .	
(Средн.)	(Средн.)
$N_0 = \ldots\ldots$	

Вторая работа с аналитическими весами

Определение истинного веса тела

При помощи рычажных весов мы сравниваем вес данного тела с весом разновесок.

Под истинным весом тела следует понимать его вес в пустоте.

Для того, чтобы определить истинный вес тела, надо его взвесить на весах, а затем, зная удельные веса воздуха, взвешиваемого тела и разновесок, вычислить его истинный вес.

Прежде чем приступить к взвешиванию тела, надо дать некоторые разъяснения о разновесках.

1. Вспомните правила взвешивания 7 и 8 предыдущей работы.

2. Комплекты разновесок в ящике обыкновенно расположены в следующем порядке:

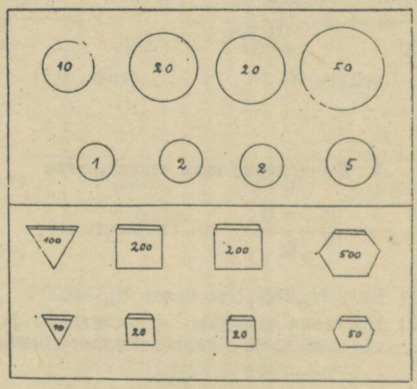


Рис. 6

Если же разновески не находятся в таком порядке, то первым долгом привести их в такой порядок, раньше чем пользоваться ими.

3. Из правила 9-го следует, что накладывать разновески на чашку весов и снимать их оттуда можно только, если весы арретированы.

4. Выбор разновесов, которыми мы уравновешиваем взве-

шиваемое тело, должен следовать с разновесок с более крупными массами к разновескам с менее крупными массами. Если про массу нашего тела мы не имеем предварительно никакого представления, то приходится раньше найти его приблизительный вес на более грубых весах (например с точностью до одного грамма). Пусть вес тела на таких весах оказался 7 граммов; тогда, положив взвешиваемое тело на левую чашку аналитических весов, мы должны на правую чашку класть массы: 5 г+2 г.

Теперь, опуская чуть-чуть арретир, мы наблюдаем, в какую сторону отклоняется правая чашка весов. Если она опускается, то масса гирь на ней сравнительно с телом велика и в этом случае мы должны снять гирьку в 2 г. и заменить гирей в 1 г. Если же правая чашка подымалась, тогда придется на чашку прибавить 1 г. После этого (в одном и в другом случае) придется снова едва опустить арретир и снова наблюдать отклонение чашки, чтобы уяснить себе новое положение. Если приблизительное взвешивание было сделано правильно, то теперь придется перейти к самой большой миллиграммовой разновеске (500 мг.). Ее придется или просто прибавить, если предыдущая масса разновесок на чашке оказалась меньшей, чем масса тела, или же (в противном случае) ей придется заменить массу в 1 г.

Таким методом нужно работать последовательно дальше, пока не уравновесим тело с точностью до 10 мг.

Этой точности нам недостаточно. Аналитические весы позволяют определить массу тела с точностью до 0,1 миллиграмма. Для этого необходимо употребить рейтер и определить чувствительность нагруженных весов.

Взвешивание

Прежде всего, просмотрев весы (и если они окажутся в порядке), надо определить нулевую точку N_0.

Затем кладем на середину левой чашки взвешиваемое тело и выбираем, как было указано (в пункте 4), соответствующие разновески с точностью до 10 мг. Затем садим рейтер так, чтобы точка равновесия находилась в пределах двух делений шкалы от нулевой точки. Этого мы достигаем пробным путем на глаз. Теперь определим точку равновесия. Если она находится вправо от N_0, то назовем ее $N_п$, а вес разновесок плюс вес соответствующий моменту рейтера обозначим через $P_п$. Тогда $P_п < P$, где P означает искомый вес взвешиваемого тела. Затем

перемещаем рейтер так, чтобы точка равновесия переместилась налево от N_0 в пределах двух делений.

Регистрируя также этот новый вес $P_л$ ($P_л > P$), определим новую точку равновесия $N_л$.

Затем проверим еще раз нулевую точку, определив ее снова. Если снова найденная нулевая точка отличается от прежде найденной на 0,2 деления или меньше, то за окончательную нулевую точку следует брать среднее значение между ними. В случае же, если последняя нулевая точка от прежней отличается больше чем на 0,2 деления, придется сообщить об этом преподавателю, прерывая пока дальнейшую работу.

Вес тела в воздухе вычисляем по найденным величинам $P_п$, $P_л$, N_0, $N_п$ и $N_л$.

Сперва найдем чувствительность весов при данной нагрузке

$$\tau = \frac{N_п - N_л}{P_л - P_п}.$$

Затем найдем, насколько вес тела больше $P_п$ или меньше $P_л$;

$$x_1 = \frac{N_п - N_0}{\tau}; \quad x_2 = \frac{N_0 - N_л}{\tau}.$$

Получим вес тела в воздухе $P = P_п + x_1$, или $P = P_л - x_2$.

Наконец вычислим истинный вес тела.

При этом надо иметь в виду, что по закону Архимеда не только взвешиваемое тело, но и разновески, на которых отмечен их истинный вес, теряют в воздухе часть своего веса, которая равняется весу воздуха, взятому в объеме разновесок.

Пусть истинный вес тела будет P_0, его объем V, вес разновесок P, их объем v и удельный вес воздуха ϱ. Тогда можем писать, на основании равновесия весов:

$$P_0 - V\varrho = P - v\varrho,$$

откуда

$$P_0 = P + V\varrho - v\varrho. \qquad (1)$$

Если удельные веса нашего тела и разновесок будут соот-

ветственно D и d, то объемы V и v приближенно выражаются так:

$$V=\frac{P}{D} \text{ и } v=\frac{P}{d};$$

подставив эти выражения в формулу (1), получим:

$$P_0=P+\frac{P}{D}\rho-\frac{P}{d}\rho,$$

откуда после преобразования получим окончательно:

$$P_0=P\left[1+\rho\left(\frac{1}{D}-\frac{1}{d}\right)\right].$$

Отсюда видим, что если $D<d$, истинный вес тела больше веса в воздухе: если $D=d$, то истинный вес равняется весу в воздухе: и наконец, если $D>d$, то истинный вес меньше веса в воздухе.

В случае пробки следует брать $D=0{,}24\ \frac{г}{см^3}$, для латуневых разновесок берем $d=8{,}4\ \frac{г}{см^3}$ а за удельный вес воздуха берем $\rho=0{,}0012$ г/см³, что соответствует приблизительно его значению при комнатной температуре и нормальном давлении.

Результаты опыта следует внести в следующие таблицы:

II. Работа на аналитических весах.

1. Определение нулевой точки N_0

Замечание: N_0 должны укладываться между делениями шкалы от 9,0—11,0.

Лев.	Прав.	Лев.	Прав.	Лев.	Прав.
. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
. . . . .		. . . . .		. . . . .	
(Ср.)	(Ср.)	(Ср.)	(Ср.)	(Ср.)	(Ср.)
$N_0=$.		$N_0=$.		$N_0=$.	

(с точностью до 0,1)

Среднее $N_0=$. . . . . (с точн. до 0,1)

2) Определение левой точки равновесия

Разновески: (разновески перечислить и суммировать).

Рейтер: ± . . . . . мг.

Сумма: разновески ± рейтер = $P_л$ =

Лев.	Прав.	Лев.	Прав.	Лев.	Прав.
. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
. . . . .		. . . . .		. . . . .	
(Ср.)	(Ср.)	(Ср.)	(Ср.)	(Ср.)	(Ср.)
$N_л$ = ...		$N_л$ = ...		$N_л$ = ...	

(с точн. до 0,1) Среднее $N_л$ = ... (с точн. до 0,1)

3. Определение правой точки равновесия $N_п$

Разновески:

Рейтер ± . . . . . мг

Сумма: разновески ± рейтер = $P_п$

Лев.	Прав.	Лев.	Прав.	Лев.	Прав.
. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
. . . . .		. . . . .		. . . . .	
(Ср.)	(Ср.)	(Ср.)	(Ср.)	(Ср.)	(Ср.)

$N_п$ = (с точ. до 0,1) $N_п$ = $N_п$ =

Среди. $N_п$ = ... (с точн. до 0,1)

4. Контроль нулевой точки

Лев.	Прав.
. . . . .	. . . . .
. . . . .	. . . . .
. . . . .	
(Ср.)	(Ср.)

N_0 = ...

5. Вычисление чувствительности нагруженных весов

$$\tau = \frac{N_п - N_л}{P_л - P_п}$$

6. Вычисление поправки x_1; x_2;

$$x_1 = \frac{N_п - N_0}{\tau} \qquad x_2 = \frac{N_0 - N_л}{\tau}$$

Вес тела в воздухе $P = P_п + x_1$;

Вес тела в воздухе $P = P_л - x_2$;

7. Истинный вес тела (вес в пустоте)

$$P_0 = P + \varrho P \frac{(d-D)}{D \cdot d}.$$

Третья работа с аналитическими весами

Определение удельного веса твердого тела по закону Архимеда

Для определения удельного веса тела $\left[d = \frac{P_1}{V} = \frac{\text{вес тела}}{\text{объем тела}}\right]$ надо измерить вес и объем тела. Вес тела можно определить с большой точностью (до 0,1 мг), чего нельзя сказать относительно определения объема, особенно если тело имеет неправильную форму. Поэтому для точного определения удельного веса надо применить такой метод, который дает возможность определить объем, не прибегая к определению размеров тела.

Объем тела определяют из закона Архимеда, по которому тело, погруженное в жидкость, теряет в весе столько, сколько весит объем вытесненной телом жидкости, т. е. DV, где D — удельный вес жидкости, а V — объем тела. Поэтому, взвесив тело один раз в воздухе (P_1) и другой раз, погрузив его в жидкость (P_2), мы найдем потерю веса ($P_1 - P_2$). А это значит, что $DV = P_1 - P_2$, откуда $V = \frac{P_1 - P_2}{D}$.

Отсюда легко найти удельный вес тела:

$$d = \frac{P_1}{V} = \frac{P_1 D}{P_1 - P_2}. \qquad (1)$$

Внесем еще поправки на потерю веса в воздухе. Если удельный вес твердого тела в пустоте обозначить через d_0, то в воздухе он будет иметь величину $d_0 - \lambda$, где λ — удельный вес

воздуха. Точно также и удельный вес жидкости в воздухе будет $D_0 - \lambda$, если в пустоте он равен D_0.

Таким образом соотношение (1) следует переписать так:

$$d_0 - \lambda = \frac{P_1 (D_0 - \lambda)}{P_1 - P_2}, \quad \text{откуда } d_0 = \frac{P_1}{P_1 - P_2} (D_0 - \lambda) + \lambda.$$

Удельный вес воздуха можно принять равным 0,0012 $\frac{г}{см^3}$, а удельный вес жидкости (воды) следует, соответственно комнатной температуре, брать из таблицы.

Как производится взвешивание в воздухе, мы уже знаем. Для взвешивания же в воде следует подвесить тело на тонкой проволочке, весом которой мы пренебрегаем, погрузив его в стакан с дистиллированной водой, который стоит на скамеечке, как показано на рисунке.

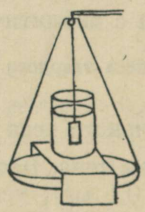


Рис. 7.

Таблица плотности воды в зависимости от температуры

Темпер. в C°	Плотность в $\frac{г}{см^3}$	Темпер. в C°	Плотность в $\frac{г}{см^3}$
10	0,9997	18	0,9956
11	0,9996	19	0,9984
12	0,9995	20	0,9982
13	0,9994	21	0,9980
14	0,9992	22	0,9978
15	0,9991	23	0,9976
16	0,9990	24	0.9973
17	0,9988	25	0,9971

Результаты опыта следует внести в следующие таблицы:

III. Работа на аналитических весах.

Взвешивание в воздухе

1. Определение нулевой точки N_0

Лев	Прав.	Лев	Прав.
. . . . .		. . . . .	
	. . . . .		. . . . .
. . . . .		. . . . .	
	. . . . .		. . . . .
. . . . .		. . . . .	
(Ср.)	(Ср.)	(Ср.)	(Ср.)
$N_0 =$		$N_0 =$	

(с точн. до 0,1)

Среднее $N_0 =$ . . . . . (с точн. до 0,1)

2. Определение левой точки равновесия $N_л$

Разновески:

Рейтер: ± . . . . . мг.

Сумма: разновески ± рейтер $= P_л =$

Лев	Прав.	Лев	Прав.
. . . . .		. . . . .	
	. . . . .		. . . . .
. . . . .		. . . . .	
	. . . . .		. . . . .
. . . . .		. . . . .	
(Ср.)	(Ср.)	(Ср.)	(Ср.)
$N_л =$		$N_л =$	

(с точн. до 0,1)

Среднее $N_л =$ . . . . . (с точн. до 0,1)

3. Определение правой точки равновесия $N_п$

Разновески: . . . . . г

Рейтер: ± . . . . . мг

Сумма: разновески ± рейтер $= P_п =$

Лев	Прав.	Лев	Прав.
. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
. . . . .		. . . . .	
(Средн. $N_п =$	(Средн.)	(Ср. $N_п =$	(Ср.)

(с точн. до 0,1)

Среднее $N_п =$

4. Контроль нулевой точки N_0

Лев	Прав.
. . . . .	. . . . .
. . . . .	. . . . .
. . . . .	
(Ср.) $N_0 =$	(Ср.)

5. Вычисление чувствительности нагруженных весов τ

$$\tau = \frac{N_п - N_л}{P_л - P_п} = \quad . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ .$$ и т. д.

6. Вычисление поправки:

$$x_1 = \frac{N_п - N_0}{\tau} \ ; \ x_2 = \frac{N_0 - N_л}{\tau}$$

Вес тела в воздухе:

$$P_1 = P_п + x_1 = P_л - x_2.$$

В такие же таблицы внесем результаты взвешивания в воде. А затем вычисляем d_0.

Общие измерения

1. Нониус.

Это приспособление, позволяющее отсчитать доли от наименьшего деления шкалы и представляет небольшой масштаб, n-делений которого совпадает с m-делениями шкалы. Таким образом, если длина наименьшего деления шкалы будет l, то длина одного деления нониуса будет $\frac{ml}{n}$. Разность длин делений на шкале и на нониусе будет: $l - \frac{ml}{n} = l\left(\frac{n-m}{n}\right)$ ... (1) т. е. $\frac{n-m}{n}$ доля наименьшего деления шкалы. Это и есть «точность» нониуса. Наиболее простой случай, когда $m=n-1$, то $\frac{n-m}{n} = \frac{n-(n-1)}{n} = \frac{1}{n}$, т. е. в этом случае деление нониуса будет на $\frac{1}{n}$-ную долю деления шкалы короче.

Чтобы выяснить, как пользоваться нониусом, представим, что нам надо измерить длину бруска s. Совмещаем один конец бруска точно с нулем нашей шкалы; тогда другой конец в общем случае не совпадает точно, скажем с N-ным делением шкалы, а на некоторую долю деления будет лежать дальше этого N-го деления шкалы.

Теперь прикладываем нулевое деление нониуса к этому второму концу бруска. Первое деление нониуса будет отстоять от следующего ($N+1$-го) деления шкалы на $\frac{1}{n}$ долю деления ближе, чем нулевое деление нониуса от N-ого (т. к. деление нониуса на $\frac{1}{n}$ -ную короче), второе деление нониуса на $\frac{2}{n}$ ближе к $N+2$-му делению шкалы и т. д. Наконец скажем, k-тое деление нониуса в точности совпадает с ($N+k$-тым) делением шкалы.

Теперь нетрудно сообразить, что второй конец бруска лежит на $\frac{k}{n}$ долей деления дальше N-ого деления, и наша длина

$$s=\left(N+\frac{k}{n}\right)l.$$

Конкретно: пусть $l=0{,}5$ мм, $n=50$ и $m=49$; точность нониуса $\frac{n-m}{n}\,l = \frac{50-49}{50}\,0{,}5$ мм $= \frac{1}{50}\,0{,}5$ мм $= 0{,}01$ мм.

Если полного совпадения делений нониуса и шкалы не наблюдается, то берут номер того деления нониуса, для которого наблюдается лучшее совпадение. Очевидно, что при этом мы делаем ошибку меньше половины точности нониуса. Из этого следует, что при измерениях с нониусом ошибка не должна превышать половины его точности.

Из приборов, в которых применяется нониус, можно указать на штанген-циркуль, катетометр, гониометр и пр.

2. Штанген-циркуль.

Штанген-циркуль применяется для измерения длин до 25—30 см, с точностью до 0,1 мм. Штанген-циркуль состоит из масштаба, на одном конце которого укреплена перпендикулярно к нему неподвижная ножка. Вторая такая-же ножка, которая может перемещаться вдоль масштаба, снабжена нониусом.

Прежде чем приступить к измерениям, надо выяснить себе точность нониуса и затем проверить нулевой отсчет. Измерение производится следующим образом: измеряемый предмет вводят между ножками штанген-циркуля, которые затем сдвигаются до соприкосновения с поверхностями предмета, закрепляют зажимный винт и производят отсчет.

Ножки штанген-циркуля выполняются так, что при помощи его можно измерять внутренний диаметр труб или ширину отверстия. Часто к подвижной ножке крепится стерженек, который позволяет измерять глубину отверстий.

Упражнения

1. Измерьте толщину стеклянной пластинки.
2. Измерьте внешний и внутренний диаметр металлической трубки.

3. Микрометр

Микрометр представляет собой массивную металлическую скобу, в концах которой находятся друг против друга неподвижный упор и микрометрический винт. Шаг винта равен одному или половине миллиметра, а на барабане нанесено соответственно 100 или 50 делений. В одном и в другом случае точность отсчета будет 0,01 мм.

При измерениях необходимо: 1) определить шаг винта и число делений на барабане и 2) определить нулевой отсчет,

который необходимо учесть при получении окончательного результата измерения.

Главным источником ошибок является неодинаковый нажим винта на поверхность измеряемых предметов. Для устранения этого недостатка микрометр снабжен фрикционной головкой, за которую и следует вращать микрометрический винт с барабаном до тех пор, пока барабан перестанет вращаться. После этого делают отсчет. При этом целые миллиметры (или полумиллиметры), отсчитываются по линейной шкале, нанесенной на удлиненном конце гайки микрометрического винта, а доли миллиметра — по делениям барабана.

Упражнение

1) Определить толщину стеклянной пластинки, измеряя ее в трех разных точках и взять среднее значение.

4. Сферометр

Сферометр состоит из треноги, концы ножек которой образуют равносторонний треугольник. В центре треноги проходит вертикальный микрометрический винт, двигающийся при вращении вверх и вниз. Шаг винта — 0,5 мм. Следовательно два полных оборота винта перемещают его вверх или вниз на 1 мм. К винту прикреплен диск, окружность которого разделена на 500 частей.

Таким образом одно деление соответствует перемещению винта на 0,001 мм. Целые и половинные миллиметры отсчитываются по вертикальной шкале, укрепленной на одной из ножек сферометра.

Для определения нулевого отсчета сферометра его ставят на пластинку из шлифованного стекла и опускают винт до тех пор, пока стержень, проходящий сквозь винт, не коснется стекла и приведет в действие индикатор находящийся в верхней части прибора. Индикатор надо установить на нуль, следя в лупу и поворачивая винт всегда в одном и том же направлении. Этим достигается то, что острие давит на поверхность стекла всегда с одной и той же силой. С такой же силой должно острие давить на поверхность того тела, толщину которого мы желаем измерить с помощью сферометра.

Если индикатор перешел случайно через нуль, то винт надо значительно повернуть назад и затем, поворачивая в прежнем направлении, установить индикатор на нуль. Этим избежим

влияния «свободного хода», имеющегося даже у самых лучших винтов. Нулевой отсчет определяем три раза и берем среднее. Дальше вращением винта поднимаем острие, подкладываем измеряемый предмет и опускаем острие вращения винта, пока индикатор не станет на нуль. Делаем опять три отсчета, подымаем каждый раз острие вверх и устанавливаем снова индикатор на нуль.

При вычислении толщины предмета надо обратить внимание на то, что при поднятии острия мы поворачиваем винт против часовой стрелки; при этом показания круговой шкалы уменьшаются. Чтобы получить истинную величину поворота, считаемого от нуля, мы должны показание отсчета вычесть из 500. То же относится к отсчету нулевого положения.

Упражнение

Определить толщину стеклянной пластинки в трех различных точках и найти его среднее значение.

Зарегистрируйте полученные результаты в следующие таблицы.

1. Измерения штанген-циркулем

Точность измерения (ошибка измерения)	
Толщина пластинки	
Внешний диаметр трубки	
Внутренний диаметр трубки	

2. Измерения микрометром толщины стеклянной пластинки

Точность измерения (ошибка измерения)	
I-й нулевой отсчет	
II-й „ „	
III-й „ „	
Средний нулевой отсчет	

Отсчет микрометра В I-м месте пластины	
Толщина пластины в I-м месте . . .	
Отсчет во II-м месте	
Толщина „ „	
Отсчет в III-м „	
Толщина „ „	
Средняя толщина	

3. Измерения сферометром толщины стеклянной пластинки

Нулевой отсчет по вертикальной шкале	
I-й нулевой отсчет по круговой шкале	
II-й „ „ „ „	
III-й „ „ „ „	
Среднее значение нулевого отсчета .	
Отсчет по вертикальной шкале . . .	
I-й отсчет по круговой шкале. . .	
II-й „ „ „ . . .	
III-й „ „ „ . . .	
Среднее значение отсчета	
Средняя толщина	

Примечание: так как диск несколько погнут, то отсчеты по вертикальной шкале могут оказаться несоответствующими действительной высоте винта. Поэтому целесообразно читать число полных оборотов винта.

Нижеследующую таблицу заполняют в конце работы после проведения всех требуемых измерений.

Результаты измерения толщины пластинки
(при помощи всех трех инструментов измеряется одна и та же пластинка).

№№	Измер. прибор	Точность (ошибка)	Результат
1	Штангенциркуль	мм	мм
2	Микрометр	мм	мм
3	Сферометр	мм	мм

Нахождение толщины пластинки по отсчетам сферометра (пример).
Нулевой отсчет по вертикальной шкале 0,0 мм.
„ по круговой 378.
Отсчет по вертикальной шкале 5,5 мм.
„ по круговой шкале 147.

Наш нулевой отсчет означает (имея в виду направление шкалы), что винт стоит чуточку выше нуля самого инструмента, а именно на 0,500—0,378=0,122 мм. Таким образом если мы винт от этого отсчета поднимем до отсчета 5,5 на вертикальной шкале и 0,000 на круговой, то винт поднялся на 5,500—0,122=5,378 мм.

Но наш отсчет не 5,5 и 0,000, а 5,5 и 0,147 это означает, что винт не дошел до положения 5,5 на 0,147 мм. т. е. толщина d=5,378—0,147=5,231 мм.

Если бы мы считали число оборотов, то нашли бы, что от нулевого отсчета до верхнего мы повернули винт на 10 оборотов с лишним. Ровно 10 оборотов дало бы отсчет по круговой шкале 378, нам же пришлось повернуть винт до отсчета 147 т. е. на 378—147=231 деление (показание шкалы уменьшается).

Винт поднялся 10×0,5 мм=5,000 мм.
+0,231
5,231 мм.

Катетометр

Описание:

Катетометром измеряют вертикальные расстояния на отдалении. Катетометр представляет собой вертикальный столб, стоящий на трех опорных винтах. Столб вращается вокруг вертикальной оси. На столбе имеется вертикальная шкала. Вдоль столба движутся салазки, состоящие из двух отдельных частей: верхней и нижней. Нижнюю часть можно закрепить винтом на любой высоте. Верхняя часть салазок несет зрительную трубу и нониус для отсчета. С нижней частью она связана микрометрическим винтом, при помощи которого можно осуществлять небольшие перемещения верхних салазок и производить их точную установку.

Зрительная труба снабжена уровнем и у большинства катетометров может быть вынута из своего ложа и перевернута на 180°.

Установка

Прежде чем приступить к измерениям, катетометр необходимо установить так, чтобы столб был точно в вертикальном положении, а ось зрительной трубы была бы направлена горизонтально.

Порядок проведения установки безразличен. Мы можем сначала установить столб в вертикальное положение и затем установить ось зрительной трубы параллельно оси уровня, т. е. в горизонтальное положение, или наоборот, раньше отрегулировать трубу и уровень, а затем установить столб.

Установка столба. Если столб сильно накренен, то выпрямляем его на глаз при помощи опорных винтов, сравнивая его направление с отвесными линиями дверей или окон.

Для более точной установки используем уровень зрительной трубы.

Устанавливаем зрительную трубу на глаз параллельно прямой, соединяющей два опорных винта (SS_1 на рис. 8), и винтом, изменяющим положение зрительной трубы, устанавливаем уровень в горизонтальное положение TT_1. Тогда в вертикальной плоскости, проходящей параллельно SS_1, мы имеем следующее (рис. 8). Столб отклонен от вертикали на угол α. Угол между горизонтальной прямой TT_1 и плоскостью NN_1, перпендикулярной к столбу, будет тоже α (угол с взаимно-перпенди-

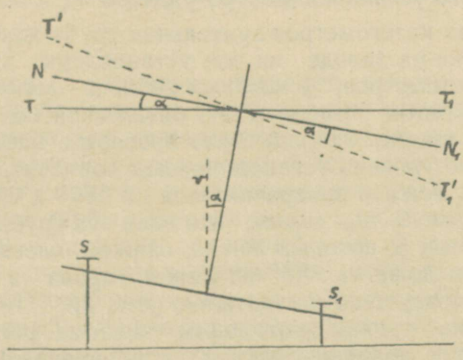


Рис. 8

кулярными сторонами). Если повернем зрительную трубу вокруг столба на 180°, то плоскость NN_1, останется неизменной, а прямая TT_1, примет положение $T'T'_1$. Из рисунка ясно, что новое положение уровня $T'T'_1$ образует с горизонтальной прямой угол 2α.

Если мы теперь вращением опорных винтов уменьшим отклонение уровня на половину (т. е. на угол α), то столб придет в вертикальное положение (положение SS_1). Оставшуюся половину отклонения уровня уничтожим вращением винта, регулирующего положение зрительной трубы. Если повернуть зрительную трубу опять на 180°, то уровень опять отклонится, но заметно меньше. Объясняется это тем, что угол 2α мы делили на глаз. Повторяя указанный прием несколько раз, мы достигнем наконец, того, что при повороте зрительной трубы на 180° уровень больше не смещается. Теперь в плоскости SS_1, столб стоит вертикально. Уровень будет ему перпендикулярным, но в плоскости, перпендикулярной SS_1, столб в общем случае будет наклонен. Поворачиваем зрительную трубу на 90° и третьим опорным винтом приводим уровень в горизонтальное положение. Теперь столб будет вертикальным в любой плоскости и при любом повороте зрительной трубы уровень остается неизменным.

Если при повороте зрительной трубы вокруг столба на 180° положение уровня всегда меняется и при этом довольно случайно, то положение уровня будет сильно меняться и при незначительном повороте (на несколько градусов). Это указывает на очень большой крен столба в плоскости, перпендикулярной SS_1. Надо повернуть зрительную трубу на 90° и третьим опорным винтом установить уровень в горизонтальное положение. После этого установка быстро удается.

У некоторых катетометров зрительная труба жестко связана с уровнем и уже на заводе их оси установлены параллельно. Есть типы катетометров, у которых уровень легко смещается специальным винтом относительно оптической оси зрительной трубы. Здесь придется каждый раз проверять параллельность осей. Для этого уровень устанавливается горизонтально, труба вынимается из ложа и поворачивается на 180° и вкладывается обратно. На рис. 9 мы видим, что если ось трубы образует с осью уровня угол β, который лежит, скажем, слева, то при повороте трубы в ложе на 180° он ляжет справа и мы увидим, что уровень образует с горизонталью угол 2β. Половину смещения пузырька уровня производим винтом, регулирующим уровень, вторую половину винтом, поворачивающим трубу и

уровень вместе. Так как деление угла происходит на глаз, то прием приходится повторять несколько раз, пока при повороте трубы смещения не будет.

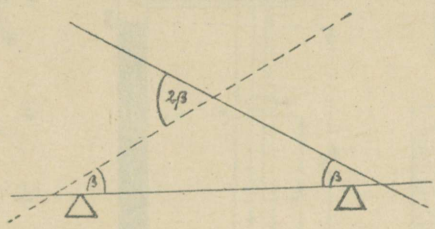


Рис. 9

Далее необходимо провести фокусировку зрительной трубы. Сначала фокусируется на крест нитей окуляр так, чтобы было видно резкое изображение нитей. Затем зрительную трубу направляют на измеряемый предмет и, передвигая окуляр вместе с крестом нитей, добиваются резкого изображения предмета. Необходимо уничтожить параллакс. Если, смотря в трубу, сместить слегка голову, то крест нитей смещается относительно изображения предмета. Это обусловлено тем, что крест нитей не совпадает с изображением. Передвигаем крест нитей вместе с окуляром в одну или другую сторону пока параллакс не исчезнет. Возможно теперь придется сдвинуть немного окуляр, чтобы получить более резкое изображение.

Правильность установки необходимо показать ассистенту.

Задание.

При помощи катетометра определить высоту столбов двух жидкостей в сообщающихся сосудах, и на основании полученных данных вычислить удельный вес одной из жидкостей, зная удельный вес другой. Определим точность нониуса. Освободим зажимный винт салазок, поддерживая их рукой и, смотря поверх зрительной трубы, установим ее приблизительно на точку А (рис. 10). Закрепим зажимный винт и, смотря в трубу, микрометрическим винтом установим горизонтальную нить трубы точно на поверхность раздела жидкостей. Сделаем отсчет высоты по нониусу. Обозначим его n_1. Таким же образом делают отсчеты n_2 и n_3, соответствующие точкам В и С. Высота столба $AB=h_2=n_2-n_1$ и столба $A_1C=h_1=n_3-n_1$.

Известно, что удельные веса d_1 и d_2 двух жидкостей в сообщающихся сосудах обратно пропорциональны высотам h_1 и h_2 их уравновешивающихся столбов. То-есть: $\frac{d_1}{h_2} = \frac{d_2}{h_1}$.

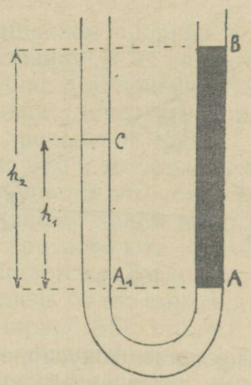


Рис. 10

Зная удельный вес одной жидкости, напр. d_1, можно вычислить удельный вес d_2 другой.

В нашем случае безцветная жидкость — вода, удельный вес которой возьмем равным единице; надо определить удельный вес красной жидкости.

Результаты следует внести в следующую таблицу:

Цена наименьшего деления на основной шкале l_m	
Число делений на нониусе n (совпадающих с n—1 делением на основной шкале)	
Точность нониуса: $\frac{l_m}{n}$	
Отсчет n_1	
Отсчет n_2	
Отсчет n_3	
Высота h_1	
Высота h_2	
Искомый удельный вес	

Определение удельного веса жидкости весами Вестфаля и Мора

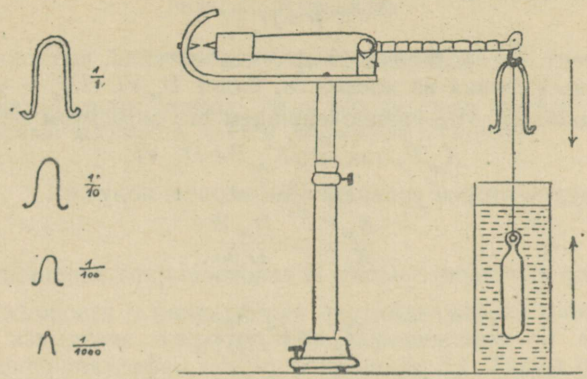


Рис. 11

Весы Вестфаля и Мора позволяют определить удельный вес жидкостей. Это рычажные весы. Одно из плеч-рычага разделено на 10 равных частей, где на каждой десятой доле имеется зарубка. На десятом делении этого плеча висит стеклянный груз.

На другом плече укреплен металлический постоянный груз. Это плечо служит одновременно указателем равновесия и кончается острием. При равновесии острие рычага находится против острия штатива. Гири весов выполнены в виде рейтеров: два больших одинакового веса, вес среднего рейтера в 10 раз меньше веса большого, а вес меньшего, в свою очередь, в 10 раз меньше веса среднего рейтера. При выполнении работы стеклянный груз уравновешивается в воздухе (при помощи винта в ножке). Затем стеклянный груз погружают в соответствующий сосуд с водой и уравновешивают рейтерами. Если обозначим момент силы, создаваемый большим рейтером на 10-ом делении P, то уравновешивающий момент применненных рейтеров выражается в долях P, то есть $K_в P$.

После этого стеклянный груз высушивается и погружается в жидкость, удельный вес которой определяют и уравновешивают снова рейтерами. Полученный уравновешивающий момент можно обозначить $K_ж P$.

Момент, который создает архимедова сила, выталкивающая стеклянный грузик из воды, будет $D_в Vl$ ($D_в$ — удельный вес

воды при температуре опыта. V — объем стеклянного грузика, l — длина рычага). Этот момент мы уравновешиваем моментом рейтеров $K_в P$, так что

$$K_в P = D_в Vl. \qquad (1)$$

Момент, который создает архимедова сила, выталкивающая стеклянный грузик из жидкости, будет $D_{ж} Vl$ ($D_{ж}$ — удельный вес жидкости). Мы уравновешиваем его моментом рейтеров $K_{ж} P$, так что

$$K_{ж} P = D_{ж} Vl. \qquad (2)$$

Разделив второе уравнение на первое, получим:

$$\frac{K_{ж} P}{K_в P} = \frac{D_{ж} Vl}{D_в Vl},$$

откуда

$$D_{ж} = D_в \frac{K_{ж}}{K_в}.$$

Наблюдения и результаты работы протоколируем в виде следующей таблицы.

Измерения в воде

	Деление плеча	Момент $K_в$
Один большой рейтер		
Другой „ „		
Средний „		
Меньший „		

Суммарный момент в долях P . . . . . $K_в =$

Измерения в жидкости

	Деление плеча	Момент $K_{ж}$
Один большой рейтер		
Другой „ „		
Средний „		
Меньший „		

Суммарный момент в долях P . . . . . $K_{ж} =$

Определение коэффициента внутреннего трения (вязкости) воды по Пуазейлю

1. Общие теоретические сведения

При ламинарном потоке сила внутреннего трения между двумя слоями жидкости дается формулой Ньютона

$$F = \eta \frac{dv}{dx} S, \qquad (1)$$

где — S площадь соприкосновения рассматриваемых слоев, $\frac{dv}{dx}$ градиент скорости в направлении перпендикулярно площади S (то-есть изменение скорости при перемещении на единицу длины перпендикулярно потоку и площади S). Таким образом из приведенной формулы выясняется физический смысл коэффициента внутреннего трения, если $S = 1$ см^2; $\frac{dv}{dx} = 1 \frac{см}{сек. см}$, то $\eta = F$. Это значит, что коэффициент внутреннего трения равняется силе, действующей между двумя слоями жидкости площадью в один см^2, на которой градиент скорости равняется единице.

Пуазейлем дана формула для расчета объема V жидкости, вытекающей через капилляр, с радиусом r и длиной l за время t:

$$V = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\pi r^4 t}{8l} p, \qquad (2)$$

где p — разность давлений на концах капилляра, а η коэффициент внутреннего трения. Если мы решим (2) относительно η, то

$$\eta = \frac{\pi r^4 t}{8lV} p. \qquad (3)$$

Из этой формулы видно, что коэффициент внутреннего трения жидкости прямо пропорционален четвертой степени радиуса капиллярной трубки, времени вытекания, градиэнту давления $\frac{p}{l}$ и объему вытекающей жидкости.

Если мы в формуле (3) подставим r и l в сантиметрах, t в секундах, V в см^3 и p в барах, т. е. $\frac{динах}{см^2}$ то получим единицу коэффициента вязкости $\frac{г}{см. сек.}$, которую называют «пуаз».

2. Описание прибора и проведение работы

Стеклянный резервуар (А) кончается длинной (около 1 м) и широкой (диаметр 10—20 см) коленчатой трубкой (В).

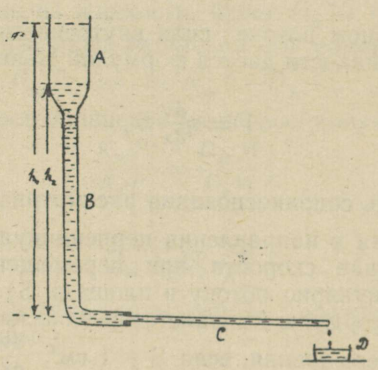


Рис. 12

В нижний конец трубки при помощи резиновой пробки вставлена горизонтально капиллярная трубка С, под открытым концом которой поставлен сосуд D.

Для проведения опыта закрывают заостренной спичкой свободный конец капилляра и вливают в резервуар А воды, пока поверхность воды будет на 1—2 см. ниже края резервуара. Измеряют масштабом высоту столба воды h_1 над свободным концом капилляра. Затем, следя за секундной стрелкой часов, открывают отверстие капилляра и засекают момент времени (с точностью до секунды). Вода вытекает и собирается в сосуд D до тех пор, пока поверхность воды в резервуаре А не понизится примерно на 10—15 сантиметров. Закрывают капилляр и засекают время. Затем определяют высоту столба жидкости h_2 и определяют взвешиванием с точностью до 1 г объем воды, вытекшей через капилляр в сосуд D.

Давление в капиллярной трубке очевидно зависит от высоты столба воды над капилляром, но так как эта высота почти равномерно уменьшается от первоначального значение h_1 до h_2, то мы вправе взять среднее значение между ними $h=\frac{h_1+h_2}{2}$ и считать как будто это постоянное значение высоты имело ме-

сто в продолжение всего опыта. Давление столба жидкости, как известно, дается формулой:

$$p = \varrho g h \left[\frac{дина}{см^2}\right]. \qquad (4)$$

Радиус капилляра определяется следующим образом. В высушенный чистый капилляр засасывается столб ртути длиной 100—150 мм. Измеряется его длина l_1 с точностью до 1 мм. Затем этот столбик выливается в легкую стеклянную чашечку и на аналитических весах определяют его вес P. Объем V_1 этого цилиндрического столбика выражается

$$V_1 = \frac{P}{d} = \pi r^2 l_1, \qquad (5)$$

откуда

$$r = \sqrt{\frac{P}{\pi l_1 13{,}6}}. \qquad (6)$$

Измеренные величины и результаты следует внести в следующую таблицу.

Таблица

Высота столба воды начале опыта h_1	
Высота столбца воды в конце опыта h_2	
Среднее значекие $\frac{h_1+h_2}{2}$	
Длина капилляра l	
Объем вытекшей воды V	
Радиус капилляра r	
Продолжительность вытекания t	
Коэфициент вязкости воды η	

Определение модуля Юнга методом растяжения

Основные теоретические сведения

Свойство твердых тел восстанавливать свою форму после снятия деформирующих сил называем упругостью.

Упругие деформации могут быть разнообразными, — как, например, продольное удлинение, поперечное сжатие, изгиб, сдвиг, кручение и пр. Для всех видов деформаций действителен закон Гука: при небольших деформациях деформация пропорциональна действующей силе. Для деформации растяжения прутка длиной l с однородным сечением S закон Гука можно записать:

$$\Delta l = \frac{l}{E}\,\frac{F}{S}, \qquad (1)$$

где F — растягивающая сила, Δl — удлинение, а E — модуль Юнга, — постоянная, характеризующая упругие свойства данного материала.

Решим уравнение (1) относительно E:

$$E = \frac{Fl}{S\Delta l} \qquad (2)$$

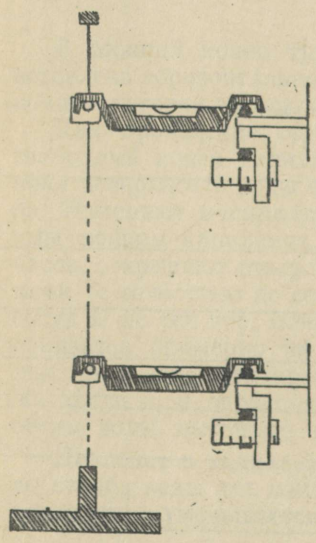


Рис. 13.

Величину $\frac{F}{S}$ называют напряжением. Это есть сила, приходящая на единицу площади, перпендикулярной силе и является векторной величиной.

Минимальное напряжение, при котором появляется остаточная деформация, называется пределом упругости.

Минимальное напряжение при котором наблюдается отклонение от закона Гука, называется пределом пропорциональности.

На основании уравнения (2) E можно рассматривать как силу, которую надо приложить к телу с сечением в одну квадратную единицу, чтобы удлинить его на первоначальную длину.

Выполнение работы

Растягиваемым образцом служит проволока, один конец которой закреплен в кронштейне, а на нижний конец подвешивается небольшой груз, чтобы выпрямить проволоку. Для растяжения проволоки к этому грузу добавляются гири. На проволоке на некотором расстоянии друг от друга прикреплены два зажима, против которых на стене установлены два вертикальных микрометрических винта.

Верхний конец каждого винта заострен, а к нижнему концу прикреплен маленький барабан, на боковой поверхности которого нанесены деления шкалы. На зажимы на проволоке и на острия этих винтов опираются два уровня, при помощи которых возможно определить удлинение проволоки.

Прежде всего надо определить шаг микрометрического винта. Для этого при помощи штанген-циркуля измеряем насколько мм-ов поднимается или опускается острие винта, если мы его поворачиваем, например, на 10 полных оборотов в одну или в другую сторону. Из полученных данных легко вычисляется шаг винта. Затем надо определить точность винта, т. е. насколько винт поднимается или опускается, если повернуть барабан винта на одно деление.

Из формулы (2) видно, что для вычисления модуля Юнга надо измерить длину проволоки, приложенную силу, сечение и удлинение. Удлинение определяется для отрезка проволоки, находящемся между зажимами, так что величина l — расстояние между зажимами на проволоке; его измеряем линейкой или лентой с точностью до миллиметра.

Сечение S вычисляем по диаметру проволоки. Диаметр измеряем микрометром (не забудьте определить нулевой отсчет) в трех местах (наверху, в середине и внизу) и берем среднее сечение.

Приложенная сила F — это добавочный груз (не больше 5 кГ!); его надо определить на весах с точностью до 5 грамм.

Для определения удлинения проволоки устанавливаем при помощи микрометрических винтов оба уровня в горизонтальное положение и делаем отсчет обоих винтов. Нагружаем проволоку и опять устанавливаем уровни в горизонтальное положение; при этом отсчитываем число полных оборотов и число делений на барабане, на которые нам приходится опускать один и другой винт. Отсюда, зная шаг винта и точность, легко найти понижение одного и другого зажима. Верхний зажим опустился вследствие того, что подался кронштейн и удлинилась часть проволоки, находящаяся выше зажима. Понижение

нижнего зажима обусловнено также изгибом кронштейна, удлинением части проволоки выше зажима, и удлинением проволоки между зажимами. Таким образом разность понижений зажимов даст нам удлинение проволоки между зажимами. Единицей модуля Юнга в системе CGS будет $\frac{дн}{см^2}$.

В технике применяется единица кГ/мм².

Результаты измерений и вычислений внесите в следующую таблицу.

10-ти полным оборотам барабана соответствует подъем (спуск) винта.	..... мм
1-му полному обороту соответствует (шаг винта)	..... мм
Число больших делений на барабане	.....
Цена 1-го большого деления	..... мм
Число малых делений в 1-ом большом делении	.....
Цена 1-го маленького деления	..... мм
Отчет нижнего барабана в начале (без нагрузки)	.....
Отсчет верхнего барабана в начале (без нагрузки)	.....
Число полных оборотов и делений, на которые пришлось повернуть нижний барабан для восстановления равновесия уровня при нагрузке.	.....
То же самое для верхнего барабана.	.....
Конечный отсчет нижнего барабана (при нагрузке)	.....
Конечный отсчет верхнего барабана (при нагрузке)	.....
Понижение нижнего зажима	..... мм
Понижение верхнего зажима	..... мм
Удлинение проволоки между зажимами	$\Delta l =$ ..... мм

Длина проволоки между зажимами l= ..... мм
Диаметр проволоки наверху: d_1 ..... мм
Диаметр проволоки в середине: d_2 ..... мм
Диаметр проволоки внизу: d_3 ..... мм
Площадь сечения: S_1 = ... мм^2
„ „ S_2 = ... мм^2
„ „ S_3 = ... мм^2
S = ... мм^2
F = ... кГ
E = ... $\frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$
E = ... $\frac{\text{дин}}{\text{см}^2}$

Точность измерения всех величин, входящих в формулу (1), должна быть такова, чтобы их относительные погрешности были бы одного и того же порядка.

Определение удельной теплоемкости твердого тела

1. Общие сведения

За единицу количества теплоты принимается — калория, то количество теплоты, котрое необходимо для нагревания 1 г. воды на 1°С, а именно с 19,5° до 20,5°С.

Эта единица количества теплоты называется малой калорией в отличие от большой калории (ккал), которая содержит 1000 малых калорий.

Количество теплоты, приобретаемое телом при нагревании

или теряемое при охлаждении пропорционально его массе и разности температур в конце и начале опыта, т. е.

$$Q=cm(t_2-t_1), \qquad (1)$$

где Q количество теплоты в калориях, m масса тела в граммах, t_2 конечная температура, t_1 начальная температура, а с коэффициент пропорциональности. Для определения физического смысла последнего возьмем частный случай, когда m=1 г и $t_2-t_1=1°C$. Тогда Q=c, т. е. есть количество теплоты необходимое для нагревания 1 г тела на 1°С. Это количество теплоты называется удельной теплоемкостью вещества, из которого состоит нагреваемое тело.

Из соотношения (1) получаем:

$$c=\frac{Q}{m(t_2-t_1)},$$

откуда ясно, что единицей удельной теплоемкости должно быть $\frac{кал}{г\,град}$.

Теплоемкость или водяной эквивалент тела, это то количество теплоты, которое надо дать телу, чтобы его температуру повысить на 1°С. Теплоемкость любого тела может быть выражена произведением удельной теплоемкости на массу в граммах.

2. Метод смешивания

Этот метод заключается в том, что два тела, нагретые до различных температур, приводятся в соприкосновение и при этом сколько потеряет тепла более нагретое тело, столько же приобретает более холодное тело, при условии, что теплота не теряется в окружающее пространство. Для создания соответствующих условий и измерений пользуемся калориметром.

Калориметр состоит обыкновенно из двух сосудов, входящих один в другой и изолированных друг от друга войлоком или другим изолирующим материалом. Калориметр имеет крышку с двумя отверстиями, через которые проходят мешалка и термометр.

Пусть имеем тело с массой M, удельной теплоемкостью c, нагретое до t° С. Поместим это тело в калориметр с водой. Массу воды в калориметре обозначим m, температуру ее t_1 ($t_1<t$), массу внутреннего сосуда калориметра m_1 и его теп-

лоемкость c_1. Пусть конечная, общая температура будет t_2. Количество теплоты, потерянное телом, будет тогда равно $Mc(t—t_2)$. Количество теплоты, полученное водой, равно $c_2m(t_2—t_1)$ (удельная теплоемкость воды равна 1). Количество теплоты, полученное внутренним сосудом калориметра, будет равна $m_1c_1(t_2—t_1)$; тогда:

$$Mc(t—t_2)=mc_2(t_2-t_1)+m_1c_1(t_2-t_1), \qquad (1)$$

откуда получаем выражение для искомой удельной теплоемкости тела в следующем виде:

$$c=\frac{(mc_2+m_1c_1)(t_2-t_1)}{M(t-t_2)} \qquad (2)$$

Исследуемое тело дает преподаватель. Это тело надо нагреть в водяной бане до 100°С. Первым делом необходимо выяснить количество воды в бане. Уровень воды должен быть на половине высоты сосуда.

Если уровень ниже, то необходимо долить воды. Под баню ставят бунзеновскую горелку и нагревают баню.

Выполнение работы

Исследуемое тело взвешивают на технических весах с точностью до 0,1г и опускают его, держа за нить во внутреннюю полость бани. Затем вынимают внутренний сосуд калориметра и взвешивают с точностью до 0,1 г. Вливают в него из-под крана холодной воды приблизительно до 2/3 его объема и снова взвешивают вместе с водой. Пусть вес пустого сосуда будет m_1, вес его с водой m_2, тогда вес воды $m=m_2—m_1$. Вставив теперь этот сосуд с водой обратно во внешний сосуд калориметра и закрыв его крышкой, опускают через соответствующее отверстие термометр в воду. От времени до времени обращают внимание на баню. С того момента, когда вода в бане начинает кипеть, надо ей давать кипеть минут 10—15, чтобы наше тело могло принять температуру кипения воды, т. е. 100°С. Тогда подносят калориметр к бане, отсчитывают температуру воды в калориметре и открывают крышку; вынимают за нитку тело из бани и немедленно опускают его в воду калориметра и тотчас же закрывают калориметр крышкой. Теперь начинают помешивать мешалкой воду в калориметре и одновременно следят за повышением температуры. Когда температура перестанет подниматься, отсчитытывают окончательную температуру.

Температуру отсчитывают с точностью до 0,1°. Все отсчеты и результаты измерений следует тотчас же вписать в соответствующую таблицу. Удельная теплоемкость цинка, из чего сделан калориметр, равняется 0,093 $\frac{кал}{град \cdot г}$. Теперь мы имеем все данные, чтобы по формуле (2) вычислить удельную теплоемкость данного тела.

Результаты опыта и вычисления внести в следующую таблицу:

	Вес	начальн. температ.	конечная температ.	удельная теплоемк.	водяной эквивалент
калориметр с водой					
калориметр (внутренний сосуд)					
Вода					
Данное тело					

Определение механического эквивалента теплоты при помощи прибора Каллендера

1. Теоретические сведения и описание аппарата

Затрачивая определенное количество механической работы, мы получаем эквивалентное количество теплоты. Это дает возможность выражать механическую энергию в тепловых единицах и наоборот. Для этого нужно знать механический эквивалент теплоты.

Механическим эквивалентом теплоты называется число килограммометров работы, эквивалентное одной большой калории. Чтобы определить механический эквивалент теплоты, необходимо поставить опыт таким образом, чтобы затраченная механическая работа целиком перешла в теплоту. Зная затраченную работу A (в килограммометрах) и эквивалентное этой работе количество теплоты (в больших калориях), получим механический эквивалент теплоты E:

$$E = \frac{A}{Q} \frac{кГм}{ккал}. \qquad (1)$$

. Это справедливо лишь в том случае, если вся затраченная работа целиком перешла в теплоту, которую мы измеряем. Превращение механической энергии в тепловую мы осуществляем на приборе Каллендера.

Прибор Каллендера представляет цилиндрический латунный калориметр (рис. 14), укрепленный на горизонтальной оси. Ось приводится во вращение от руки или электромотором. На боковую поверхность цилиндра одевается система бархатных лент, которая натягивается грузами. Этими лентами и осуществляется трение, вследствии которого работа превращается в тепло.

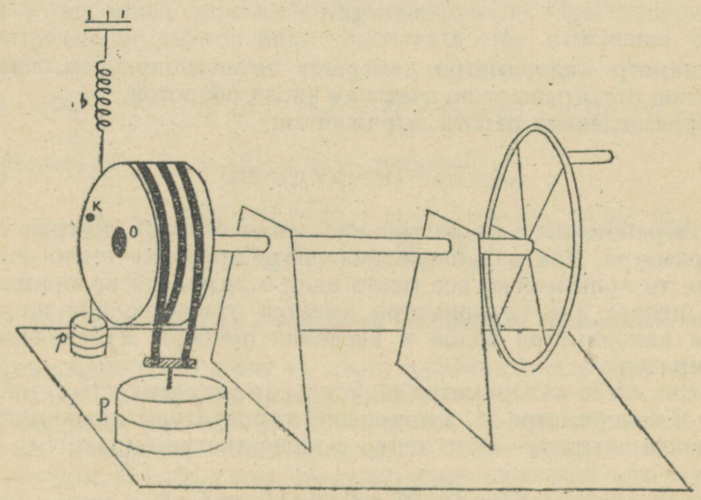


Рис. 14

Чтобы по возможности точно определить силу трения во время работы, грузы уравновешиваются: большой груз P удерживается на весу силой трения и грузом p. Малый груз p натягивает ленту — чем больше натяжение ленты, тем больше сила трения. Чтобы равновесие устанавливалось само собой, груз p связан с пружинными весами b. Если сила трения становится большой, то груз P поднимается, опускается груз p и натягивает сильнее пружину весов. Вследствие этого натяжение ленты уменьшается (на величину показания пружинных весов q) и уменьшается сила трения. Наоборот, при уменьшении силы трения груз p подымается. Натяжение поддерживаю-

щей его пружины уменьшается и увеличивается натяжение ленты. Колебания пружинных весов невелики — порядка 20—30 грамм. При работе надо наглаз определить среднее показание пружинных весов.

При равновесии грузов силу трения можно записать:

$$F=P-(p-q)=P-p+q. \qquad (2)$$

Путь, на котором эта сила производила работу, равняется длине окружности цилиндра умноженной на число оборотов:

$$s=\pi dn \qquad (3)$$

Диаметр калориметра измеряют штангенциркулем, число оборотов отсчитывают по счетчику числа оборотов.

Произведенная работа выражается:

$$A=Fs=(P-p+q)\pi dn. \qquad (4)$$

Эта работа идет на нагревание ленты боковой поверхности калориметра. Так как бархатная лента проводит тепло очень плохо, то практически все тепло идет в латунный калориметр.

В центре дна калориметра имеется отверстие для наполнения калориметра водой и введения прибора, измеряющего температуру.

Если масса калориметра m, удельная теплоемкость c, масса воды в калориметре M, а изменение температуры калориметра в течение опыта t_2-t_1, то тепло в калориметре выразится:

$$Q=(c_1M+cm)(t_2-t_1). \qquad (5)$$

2. Проведение работы.

Вывинтим выпускной винт K и убедимся, что в калориметре нет воды. Убедимся, что наружные поверхности цилиндра совершенно сухие. Оденем на калориметр ленту и подвесим груз $P\approx 4$кГ, присоединим пружинные весы и подберем величину груза p так, чтобы при вращении калориметра грузы находились в равновесии.

При помощи воронки в калориметр заливается 300 г. воды (взвесить с точностью до 0,1 г.), температура которой подбирается на 2—3°C ниже комнатной (к воде из крана прибавляют теплой воды). (Надо остерегаться замочить ленту; если

же лента окажется сырой, равновесия получить не удастся. Ленту необходимо высушить).

Записывается показание счетчика числа оборотов. Один спай термоэлемента вносят в калориметр и записывают отсчет гальванометра.

Теперь равномерно вращают калориметр так, чтобы грузы были все время в равновесии до тех пор, пока отброс гальванометра термоэлемента будет настолько же больше нуля, сколько он был меньше нуля.

Может случиться, что в течение работы сила трения изменится настолько, что равновесие грузов окажется невозможным. Тогда надо отсчитать число оборотов ($n_и$) и изменить груз p так, чтобы восстановилось равновесие. При вычислении произведенной работы надо учитывать это изменение силы трения:

$$A=(P-p_1+q_1)\,\pi d\,(n_и-n_1)+(P-p_2+q_2)\,\pi d\,(n_2-n_и). \quad (6)$$

Подставив (5) и (6) в (1), получим:

$$E=\frac{A}{Q}=\frac{(P-p_1+q_1)\,\pi d\,(n_и-n_1)+(P-p_2+q_2)\,\pi d\,(n_2-n_и)}{(c_1M+cm)(t_2-t_1)}. \quad (7)$$

3. Некоторые сведения о измерении температуры термоэлементом

Термоэлемент состоит из двух проволок различных металлов, спаянных концами между собой.

Вследствие разницы температур его спаев возникает эдс, которая измеряется подключенным в цепь зеркальным гальванометром. В небольших пределах изменения разности температур можно практически считать эдс термоэлемента пропорциональной разности температур его спаев, т. е. можно писать:

$$U=a(t_1-t_2), \quad (8)$$

где U — термо-эдс, t_1 и t_2 — температуры спаев и a — коэфициент пропорциональности, зависящей от материалов термоэлемента.

Угол φ поворота зеркала гальванометра, которым измеряется напряжение, тоже пропорционален напряжению, на основании чего пишем:

$$U=b\varphi, \quad (9)$$

где b есть констант гальванометра.

Из формул (6) и (7), исключая U, получим, что

$$t_1 - t_2 = \frac{b}{a} \cdot \varphi, \qquad (10)$$

т. е. разность температур спаев термоэлемента пропорциональна углу отклонения φ. Значение коэффициента $\frac{b}{a}$ определяется опытным путем; его значение надо спросить у преподавателя, руководящего лабораторными работами.

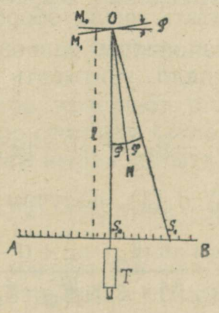


Рис. 15

У зеркального гальванометра маленькое зеркальце M_0 прикреплено к подвижной системе гальванометра (см. рис. 15). Сам гальванометр установлен на консоле стены. Перед ним на столе на расстоянии l установлена шкала АВ с телескопом Т, который снабжен окулярной нитью.

Необходимо установить шкалу перпендикулярно телескопу и сдвигать систему телескоп-шкала до тех пор пока нулевой отсчет (S_0) будет точно в середине шкалы (54) деление). Тогда при повороте зеркала гальванометра на угол φ мы отсчитаем на шкале деление S_1, соответствующее углу 2φ между падающим на зеркало лучем S_1O и отраженным лучем падающим в телескоп (рис. 15). Тогда угол поворота зеркала можно записать:

$$tg\, 2\varphi = \frac{S_1 - S_0}{l}. \qquad (11)$$

Так как угол φ мал, то $tg\varphi \approx \varphi$.

Обычно выбирают $l = 1$ м, а $S_1 - S_0$ отсчитывают в миллиметрах. Нам надо найти изменение температуры, которое будет

пропорционально углу поворота зеркала гальванометра в течение работы.

Результаты измерений внести в следующую таблицу:

Определение механической работы

№№ п/п	Наименование величины	Символ	значение величины
1	Отсчет счетчика оборотов в начале работы	n_1	
	Отсчет счетчика оборотов при изменении нагрузки	$n_и$	. . . . .
2	Отсчет счетчика оборотов в конце работы	n_2	. . . . .
3	Число оборотов при первоначальной силе трения	$n_и - n_1$	. . . . .
	Число оборотов при изменившейся силе трения	$n_2 - n_и$	. . . . .
4	Вес большого груза с подставкой	P	. . . . . кГ
5	Общий вес маленьких грузов вместе с подставкой	p_1 p_2 ,	. . . . . кГ . . . . . кГ
6	Средний отсчет пружинных весов	q_1 q_2	. . . . . кГ . . . . . кГ
7	Сила трения	F_1 F_2	. . . . . кГ . . . . . кГ
8	Диаметр цилиндра калориметра	d	. . . . . см
9	Периметр цилиндра	πd	. . . . . см
10	Длина пути, на протяжении которого сила трения действовала	s_1 s_2	. . . . . м . . . . . м
11	Механическая работа совершенная силой трения	A	. . . . . кГм

Определение образовавшегося количества теплоты:

№№ п/п	Наименование величины	Символ	значение величины
1	Масса воды в калориметре	M	. . . . . г
2	Масса калориметра (по данным паспорта)	m	. . . . . г

3	Удельная теплоемкость вещества калориметра	c	0,092 г. $\frac{\text{кал}}{\text{град}}$
4	Водяной эквивалент (теплоемкость) калориметра	mc	. . . . . $\frac{\text{кал}}{\text{град}}$
5	Общая теплоемкость системы «вода + калориметр»	$cM + mc$	. . . . $\frac{\text{кал}}{\text{град}}$
6	Температура в начале опыта	t_1	. . . . . °C
7	Температура в конце опыта	t_2	. . . . . °C
8	Возникшее количество теплоты	Q	. . . . . ккал

Если повышение температуры измеряется термоэлементом:

9	Нулевой отсчет гальванометра (оба спая находятся в одной и той же банке)	S_0	. . . . .
10	Проверка S_0 в конце работы	S_0	. . . . .
11	Отсчет по шкале в начале работы (один спай в банке, другой в калориметре)	S_1	. . . . .
12	Отсчет по шкале в конце работы	S_2	. . . . .
13	Смещения:	$S_0 - S_1$ $S_2 - S_0$	. . . .
14	Расстояние центра шкалы от зеркальца гальванометра	l	. . . . . см
15	$tg\, 2\varphi_1 = \frac{S_0 - S_1}{l}$ . . . . . ; $2\varphi_1 =$	φ_1	. . . . .
16	$tg\, 2\varphi_2 = \frac{S_2 - S_0}{l}$ . . . . . ; $2\varphi_2 =$	φ_2	. . . . .
17	Угол поворота зеркальца $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$	φ	. . . . .
18	Повышение температуры в течении вращения калориметра	$t_2 - t_1$	. . . . . °C
	$E = \frac{A}{Q}$	E	. . . . $\frac{\text{кГ-м}}{\text{ккал}}$

Определение скрытой теплоты парообразования воды

Если мы нагреем воду или какую-нибудь другую жидкость до температуры кипения и будем продолжать нагревание дальше, то мы не заметим дальнейшего повышения температуры жидкости. Сообщаемая ей теплота идет при этом на превращение жидкости в пар, т. е. на преодолевание молекулярных сил сцепления и на работу расширения.

Теплотой парообразования называется то количество теплоты, которое необходимо, чтобы превратить 1 г жидкости, нагретой до температуры кипения, в пар той же температуры. При охлаждении пар, конденсируясь в жидкость, будет отдавать то же количество теплоты. На этом принципе и основано определение теплоты парообразования.

Если мы имеем M г пара при температуре кипения t и превращаем его в жидкость при той же температуре, тогда этот пар выделит qM калорий теплоты, где q есть теплота парообразования. Когда этот ожиженный пар попадает в калориметр с водой температуры t_1, то нагревая ее до t_2, он передает при этом еще количество теплоты

$$c_1 M (t - t_2),$$

где c_1 — удельная теплоемкость жидкости.

Следовательно общее количество теплоты, отданное паром, будет:

$$qM + c_1 M (t - t_2). \qquad (1)$$

Это количество теплоты пойдет на нагревание воды и внутреннего сосуда калориметра. Теплотой, которая пойдет на нагревание термометра и мешалки, мы пренебрегаем.

Если масса воды в калориметре будет m граммов и первоначальная температура ее t_1, то количество теплоты, которое пойдет на нагревание воды и калориметра выражается так:

$$c_2 m (t_2 - t_1) + m_1 c (t_2 - t_1),$$

где m_1 — масса внутреннего сосуда калориметра и c — его удельная теплоемкость.

Это количество теплоты должно равняться тому количеству теплоты (1), которое отдали пар при конденсации и жидкость, образовавшаяся из пара при ее охлаждении до окончательной температуры t_2, т. е.

$$qM + Mc_1 (t - t_2) = mc_2 (t_2 - t_1) + m_1 c (t_2 - t),$$

откуда получаем скрытую теплоту парообразования:

$$q = \frac{(m + m_1 c)\ (t_2 - t_1) - Mc_1 (t - t_2)}{M} \left[\frac{\text{кал}}{\text{г}}\right].$$

Выполнение работы

Наливают в колбу до трех четвертей ее объема воды и ставят ее на газовую горелку. Затем берут пустой калориметр, взвешивают его на аптекарских весах и записывают его вес. Наполняют его (до $^3/_4$ объема) холодной водой и опять взвешивают и записывают вес, закрывают крышкой и определяют температуру воды в ней с точностью до 0,1°, пользуясь при этом термометром, которым можно измерить температуру по крайней мере до 100°. Отсчитывают также комнатную температуру и находят разность между температурой воды в калориметре и комнатной температурой. Если в колбе вода уже кипит и пар выходит из трубки, то надо конец трубки ввести в воду калориметра, где пар будет конденсироваться. Осторожно мешают воду и наблюдают за повышением температуры. Температуру калориметра поднимают на столько же градусов выше комнатной температуры, на сколько градусов температура воды раньше была ниже комнатной.

Когда это достигнуто, тогда сперва вынимают трубку из калориметра, а затем лишь гасят горелку, но не наоборот. Записав конечную температуру воды, вынимают термометр, снимают крышку и взвешивают калориметр с водой еще раз, чтобы определить ту массу воды, которая прибавилась от конденсации пара.

Результаты измерений и вычислений следует внести в следующую таблицу.

Таблица

	Вес	Начальн. температура	Конечн. температура	Скрытая теплота
Калориметр с водой (внутренний сосуд)				
Калориметр (внутренний сосуд)				
Вода				
Конденсированный пар				

Определение модуля сдвига

Теоретические сведения

Представим себе прямоугольный параллелепипед с площадью основания S, который неподвижно закреплен основанием. Приложим к его верхней грани сдвигающую силу F, т. е. силу, лежащую в плоскости его грани. Тогда сдвигающее напряжение будет

$$p = \frac{F}{S}, \qquad (1)$$

т. е. сдвигающая сила, действующая на единицу поверхности. Эта сдвигающая сила деформирует прямоугольный параллелепипед так, что его ребра образуют со своим первоначальным направлением угол α. По закону Гука в пределах упругости угол α пропорционален напряжению. Таким образом в данном случае угол α пропорционален действующей силе, обратно пропорционален площади S и зависит также от материала параллелепипеда

$$\alpha = \frac{F}{GS}. \qquad (2)$$

Величина G есть константа для данного материала и называется модулем сдвига.

Так как угол α величина безразмерная (радиан), то размерность G должна быть $\frac{F}{S}$, т. е. сила на единицу поверхности и на радиан. Обычно модуль сдвига измеряется, как и модуль Юнга, в $\frac{кГ}{мм^2}$ или в $\frac{дн}{см^2}$.

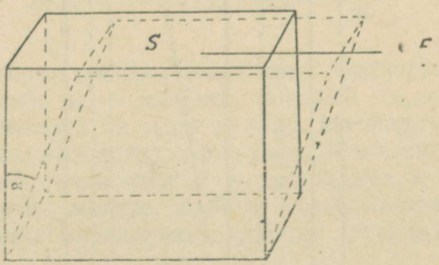


Рис. 16

Описанный метод практически не применим для определения модуля сдвига. Модуль сдвига обычно определяют методом крутильных колебаний, теорию которого приводим ниже.

TRÜ Raamatukogu

Представим себе цилиндрическую проволоку закрепленную одним концом в консоль. Закрутим ее другой конец на некоторый угол β (рис. 17). Тогда поворачиваются относительно друг-друга все поперечные сечения проволоки. Разделим мысленно эту проволоку, радиус которой r и длина l на тонкие коаксиальные полые цилиндры с толщиной стенки $d\varrho$. На рис. 17 изображен один такой цилиндр, внутренний радиус которого ϱ. $0 \leqslant \varrho \leqslant r$. На закручиваемый конец каждого такого цилиндра действуют закручивающие силы в направлении касательной. Закручивающие силы целесообразно характеризовать закручивающим моментом. Тогда полный закручивающий момент будет суммой элементарных моментов, приложенных к элементарным цилиндрам. Вследствие поворота между образующей цилиндра AB' и ее первоначальным положением AB образуется угол α. Верхний конец проволоки повернулся на дугу $BB' = \alpha l$. На эту дугу опирается и угол поворота плоскости сечения β, так что длину этой дуги мотем записать:

$$a = l\alpha = \varrho\beta, \tag{3}$$

откуда

$$\alpha = \frac{\varrho\beta}{l}. \tag{4}$$

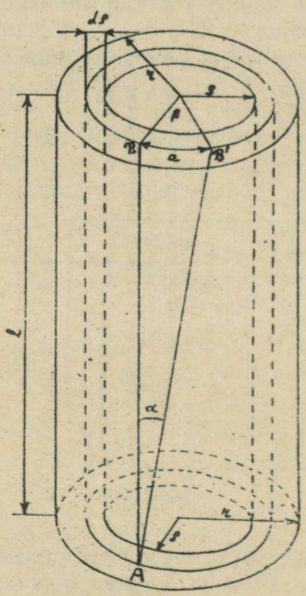


Рис. 17

Если на сечение полого цилиндра, равное

$$dS = 2\pi\rho d\rho, \tag{5}$$

действует закручивающая сила dF, то, исходя из формулы (2) в виде $F=\alpha GS$, мы находим, что

$$dF = \alpha G dS. \tag{6}$$

Подставляя α и dS из формул (4) и (5) в формулу (6), получим:

$$dF = \frac{\rho\beta G}{l} 2\pi\rho d\rho = 2\pi\frac{\beta}{l} G\rho^2 d\rho.$$

Соответствующий закручивающий момент dM — произведение силы dF на плечо ρ:

$$dM = \rho dF = 2\pi\frac{\beta}{l} G\rho^3 d\rho.$$

Полный закручивающий момент M найдем как сумму элементарных моментов путем интегрирования по всему сечению проволоки, т. е. от $\rho=0$ до $\rho=r$.

$$M = \int_0^r dM = \int_0^r 2\pi\frac{\beta}{l} G\rho^3 d\rho = 2\pi\frac{\beta}{l} G\int_0^r \rho^3 d\rho,$$

$$M = \frac{\pi\beta G r^4}{2l} = D\beta, \text{ где } D = \frac{\pi G r^4}{2l} \tag{7}$$

и называется спрямляющим моментом. Физический смысл этой величины — момент, который закручивает конец проволоки на один радиан. Из формулы (7) видно, что если известен спрямляющий момент D, измерена длина проволоки l и ее радиус r, то можно вычислить модуль сдвига. Спрямляющий момент проволоки определяют методом крутильных колебаний.

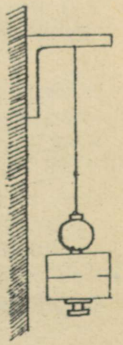


Рис. 18

Если мы закрутим диск, подвешенный на конец проволоки (рис. 17) на небольшой угол и отпустим, то он начнет колебаться. Для этого колебания мы можем записать основное уравнение вращения: Полный момент вращения M выражается как

произведение углового ускорения ϑ на момент инерции системы I и состоит из момента упругости $D\beta$ и момента трения $h\omega$

$$M=I\vartheta=-D\beta-h\omega, \tag{8}$$

где D — спрямляющий момент, h — коэффициент трения и ω — угловая скорость.

Перенесем все члены в левую часть, имея в виду, что $\vartheta=\frac{d^2\beta}{dt^2}$ и $\omega=\frac{d\beta}{dt}$.

$$I\frac{d^2\beta}{dt^2}+h\frac{d\beta}{dt}+D\beta=0. \tag{9}$$

Это уравнение затухающих крутильных колебаний имеет в точности ту же форму, что и уравнение линейных колебаний. Его решение:

$$\beta=\beta_0 e^{-\gamma t}\sin\omega'_0 t,$$

где

$$\gamma=\frac{h}{2I}$$

и угловая частота затухающего колебания

$$\omega'_0=\frac{2\pi}{T'}=\sqrt{\frac{D}{I}-\gamma^2}=\sqrt{\omega_0^2-\gamma^2}$$

или период

$$T'=\frac{2\pi}{\sqrt{\frac{D}{I}-\gamma^2}} \tag{10}$$

Если $h\approx 0$, тогда $\gamma\approx 0$ и период собственного колебания

$$T=2\pi\sqrt{\frac{I}{D}}, \tag{11}$$

откуда спрямляющий момент $D=\frac{4\pi^2 I}{T^2}$. (11а)

Момент инерции системы I можем определить.

Период собственного колебания T очень просто измерить. Тогда из формулы (11а) можем вычислить D и, подставив это значение в формулу (7), найдем модуль сдвига:

$$G=\frac{2lD}{\pi r^4}=\frac{8\pi^2 lI}{\pi r^4 T^2}=\frac{8\pi lI}{r^4 T^2}. \tag{12}$$

Так как колеблющаяся система состоит из диска, зеркала и винта, то вычислить непосредственно ее момент инерции из геометрических данных сложно. Поэтому определяем его следующим методом. Добавим к системе еще один диск, момент инерции которого I_1 мы можем вычислить:

$$I_1=\frac{1}{2}m(r_1^2+r_2^2), \tag{13}$$

где m-масса диска,

r_1-внешний радиус диска,

r_2-радиус внутреннего отверстия диска.

На основании формулы (11) мы можем писать:

$$T_1=2\pi\sqrt{\frac{I+I_1}{D}} \tag{11в}$$

Поделив уравнение (11в) на уравнение (11) и решая полученное уравнение относительно I, получим:

$$I=I_1\cdot\frac{T^2}{T_1^2-T^2}=\frac{1}{2}m(r_1^2+r_2^2)\frac{T^2}{T_1^2-T^2}. \tag{14}$$

Подставляя это значение в уравнение (12), мы получаем:

$$G=\frac{8\pi lI_1}{r^4(T_1^2-T^2)}=\frac{4\pi lm(r_1^2+r_2^2)}{r^4(T_1^2-T^2)}. \tag{15}$$

Ход работы

Из формулы (15) видно, что для определения модуля сдвига G нам нужно измерить периоды крутильных колебаний T и T_1, радиус проволоки r, длина проволоки l, радиусы дополнительно годиска r_1 и r_2 и массу дополнительного диска m.

Наибольшая относительная погрешность получается при измерении радиуса проволоки r. Поэтому его необходимо измерять микрометром в трех местах (на каждом из них в двух перпендикулярных направлениях).

Длину l проволоки измерим измерительной лентой с точностью до 1 мм.

Радиусы диска r_1 и r_2 измерим штангенциркулем с точностью до 0,1 мм, его массу с точностью до 0,1 г.

Для определения периодов колебания измеряем каждый раз продолжительность 20—50 полных колебаний.

Опытные данные протоколируем по следующей схеме:

Определение радиуса проволоки

1. Нулевой отсчет микрометра = ...	мм	
2. Отсчет на верху проволоки = ...	мм	. . . . мм
3. Отсчет в середине проволоки = ...	мм	. . . . мм
4. Отсчет внизу проволоки = ...	мм	. . . . мм

Средний отсчет = ... мм

Диаметр проволоки d = ... мм

Радиус проволоки r = ... мм = ... см.

Определение периодов крутильных колебаний T и T_1

Число полных колебаний	Основной диск.		Основной + дополнительный диск	
	Продолжительность колебаний	Период T	Продолжительность колебаний	Период T_1
Среднее T = ... сек.			Среднее T_1 = ... сек.	

Определение модуля сдвига G

Радиус дополнительного диска r_1	. . . . . см
Радиус отверстия дополнительного диска r_2	. . . . . см
Масса дополнительного диска m	. . . . . г
Момент инерции дополнительного диска $I_1 = \frac{1}{2}m(r_1^2 + r_2^2)$	. . . . . г · см.^{2}
Момент инерции основного диска $I = I_1 \cdot \frac{T^2}{T_1^2 - T^2}$	. . . . . г · см.^{2}
Длина проволоки l	. . . . . см
Радиус проволоки r	. . . . . см
r^4	. . . . . см^4
Модуль сдвига $G = \frac{8\pi Il}{r^4T^2}$	. . . . . $\frac{\text{дн}}{\text{см}^2}$

ВИСКОЗИМЕТР КЭМПФА

Устройство прибора

Вискозиметр Кэмпфа представляет из себя весьма удобный технический прибор для измерения вязкостей выше 3 пуазов. Схема его устройства показана на рис. 19.

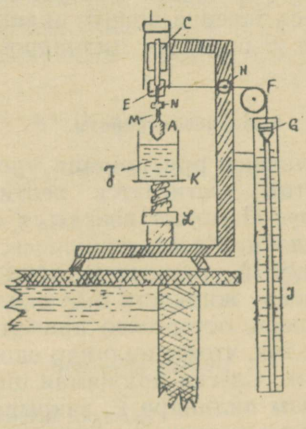


Рис. 19.

Его главная составная часть — это цилиндр А, подвешенный на особом подшипнике. Ось цилиндра затягивается соленойдом наверх, так что острие оси упирается в подшипник из твердого камня (агат или рубин). Ток в соленоиде С регулируется так, что цилиндр с осью практически висит в магнитном поле соленоида, то-есть сила, с которой острие оси упирается в подшипник, минимальна. Этим достигается весьма малая величина трения в подшипнике. В средней части оси имеется цилиндр Е с винтовыми пазами, на который наматывается нить, перекинутая через блок F.

Грузом G при помощи намотанной на цилиндр Е нитки ось приводится во вращение. Зажимом Н действие груза выключается. Груз G движется свободно в цилиндрическом желобе I, защищающем груз от воздушных течений и пр. Цилиндрический сосуд J с исследуемой жидкостью ставится на подставку К, на поверхности которой имеются концентрические круги, центром которых является ось цилиндра А. По этим кругам устанавливается сосуд J так, чтобы его центр совпал в осью

цилиндра. Подставку вращением гайки L можно поднимать и опускать. В самом узком месте оси цилиндра имеется метка M, до которой погружается цилиндр A в жидкость. Цилиндр A отвинчивается от оси в муфте N и может быть таким образом заменен цилиндром другого диаметра.

Таким образом прибором измеряется трение в жидкости, вызванное вращением цилиндра определенной формы и диаметра. Образующееся течение вокруг цилиндра в условиях работы аппарата, т. е. с большим цилиндром и выше 3-х пуаз, ламинарное.

Выполнение работы.

Прибор устанавливают при помощи уровня в горизонтальное положение. Этим достигается вертикальная установка желоба J, тогда груз G может двигаться свободно, не прикасаясь к стенкам желоба. Удостоверившись, что цилиндр A совершенно сухой и чистый, вращением гайки L поднимают сосуд J так, чтобы уровень жидкости был около метки M. Затем включается ток. Теперь, осторожно приподнимая цилиндр рукой, регулируем ток так, чтобы цилиндр едва-едва упирался бы в верхний подшипник. Слегка прижимая цилиндр A вверх, наматываем нить в пазы цилиндра E, закрываем зажим H и регулируем окончательно высоту уровня жидкости на метку M.

Этим приготовления закончены и можно приступить к опыту.

Берем в руку секундомер, открываем зажим H и, когда скорость падения груза G станет равномерной (примерно после падения груза на 10 см.), открываем секундомер, когда груз находится у какой-либо метки, и следим за его падением до последней метки на желобе. Пройденный путь s определяем по шкале на желобе. Повторяя эти наблюдения по крайней мере 5 раз, вычисляют коэфициент внутреннего трения по формуле:

$$\eta = fk\frac{t}{s}(P-F+nP_1) = fk\frac{t}{s}(x+nP_1),$$

где f является коэффициентом зависящим от диаметра сосуда J и берется из графика в паспорте прибора,
k — постоянная цилиндра A, в случае большого цилиндра, k=19,9; n — число добавочных грузов, P_1=2,50 г, вес отдельного добавочного груза, P — вес подставки, а F — сила трения в подшипниках цилиндра A и блока F. Разницу P—F=x определяем каждый раз опытным путем.

Для этого делаются измерения с большим цилиндром по крайней мере с двумя разными значениями груза n

Следует определить:

а) коэффициент внутреннего трения масла η,

б) эфективный вес подставки x,

в) коэффициент малого цилиндра k_1,

Для этого необходимо произвести три пятикратных опыта: два с большим цилиндром, при разных n и один опыт с малым цилиндром без добавочных разновесок (т. е. при $n=0$).

По средним данным опыта получаем 3 уравнения с тремя неизвестными:

$$\eta = fk\,\frac{t_1}{s}(x+n_1P_1),$$

$$\eta = fk\,\frac{t_2}{s}(x+n_2P_1),$$

$$\eta = fk_1\,\frac{t_3}{s}x.$$

(n_1 и n_2 — число добавочных разновесок при опытах), из которых определяется η, k_1 и x.

Протокол работы

№	Большой цилиндр		Малый цилиндр
	Число добавочн. грузов n_1=.	Число добавочн. грузов n_2=.	Число добавочн. грузов n_3= . . . . .
1	t_1=. . . . . сек.	t_2=. . . . . сек.	t_3=. . . . . сек.
2	t_1=. . . . . сек.		
3			
4			
5			
	Средн. t_1= . . . . сек. $\frac{t_1}{s}$=.	Средн. t_2= . . . . сек. $\frac{t_2}{s}$=.	Средн. t_3= . . . . сек. $\frac{t_3}{s}$=. . . . .

Внутр. диаметр сосуда d= мм.

Коэф. сосуда f= (из графика)

Определение отношения удельных теплоемкостей C_p/C_v газа методом Клемана и Дезорма

Удельной теплоемкостью вещества называется количество тепла, нужное для нагревания одного грамма вещества на 1°С. При изучении газов пользуются обыкновенно не удельной, а молярной теплоемкостью. Молярная теплоемкость есть количество теплоты, требующееся для нагревания одного моля газа на 1°С. У газов следует различать две молярные теплоемкости: молярная теплоемкость газа при постоянном давлении C_p и молярная етплоемкость при постоянном объеме C_v.

$C_p > C_v$, так как нагреваясь при постоянном давлении газ расширяется и совершает при этом внешнюю работу.

Для определения отношения C_p/C_v Клеманом и Дезормом был предложен в 1819 году чрезвычайно простой метод. Соответствующий аппарат состоит из герметически закрытого баллона (ок. 10 л.), в который проходит трубка, один конец которой соединен с манометром (керосинным) М, а другой конец В закрыт краном.

В крышке баллона имеется довольно большое отверстие А (диаметр 15—20 мм), закрытое клапаном, при помощи которого баллон можно открыть на очень короткое время, в течение которого давление в баллоне сравняется с внешним давлением.

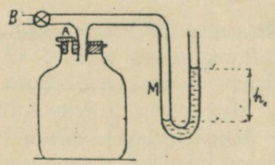


Рис. 20

Метод основан на адиабатическом расширении или сжатии газа, т. е. на таком процессе, при котором газ не вступает в тепловой обмен с окружающим пространством и изменение температуры газа достигается только расширением или сжатием газа. Адиабатические процессы подчиняются формуле Пуассона:

$p_1V_1^{\varkappa} = p_2V_2^{\varkappa} = \text{const.}$, где $\varkappa = C_p/C_v$, а p_1 и V_1 — давление и объем до адиабатического процесса; а p_2 и V_2 — давление и

объем по окончании адиабатического процесса. В уравнении $p_1V_1^{\varkappa}=p_2V_2^{\varkappa}$ величины p_1, V_1, p_2, V_2 можно измерить, и тогда из этого уравнения можно вычислить одну оставшуюся неизвестную — $\varkappa$.

Поэтому ход выполнения работы должен был бы быть следующий. Сначала измерим давление и объем данного количества газа, затем подвергаем газ адиабатическому процессу и опять измеряем давление и объем p_2, V_2. Итак для определения $\varkappa$ следовало бы произвести 4 измерения.

Но так как у нас не имеется идеальной тепловой изоляции, то практически таких измерений мы произвести не можем. Однако при достаточно быстром протекании процесса мы можем считать тепловой обмен равным нулю, т. к. мы знаем, что тепловой обмен не происходит мгновенно, а требует некоторого времени. На этих соображениях и основывается метод Клемена и Дезорма.

Пусть будет у нас в баллоне при комнатной температуре и давлении p_1 объем газа V_1. Пусть p_1 будет немного больше или немного меньше атмосферного давления. Если мы на момент откроем клапан, то в баллоне давление станет равным атмосферному p_2, а объем газа V_2. Так как выравнивание давления происходит весьма быстро, то этот процесс мы можем считать адиабатическим и писать:

$$p_1V_1^{\varkappa}=p_2V_2^{\varkappa}, \qquad (1)$$

В адиабатическом процессе мгновенно изменяется температура газа, то вследствие теплообмена она начнет сравниваться с комнатной. Но так как мы баллон сразу же закрыли, то вследствие изменения температуры будет изменяться давление в баллоне и когда температура баллона станет равной комнатной, в баллоне установится давление p_3.

Так как начальное и конечное состояние имеют одну и ту же температуру, то относительно этих состояний действительно уравнение Бойль-Мариотта

$$p_1V_1=p_3V_2 \qquad (2)$$

для того же самого количества газа.

Но тогда, если V_1 будем считать равным объему баллона, то V_2 будет неизвестный объем, т. к. при открывании клапана у нас количество газа изменилось. Однако, возведя уравнение (2) в степень $\varkappa$:

$$p_1^{\varkappa}V_1^{\varkappa}=p_3^{\varkappa}V_2^{\varkappa} \qquad (3)$$

и, поделив уравнение (3) на уравнение (1), мы исключим объем вообще..

$$\frac{p_1^{\varkappa}}{p_1} = \frac{p_3^{\varkappa}}{p_2} = p_1^{\varkappa-1} \qquad (4)$$

Прологарифмировав, получим:

$$(\varkappa-1)\log p_1 = \varkappa \log p_3 - \log p_2 \text{ или } \varkappa = \frac{\log p_1 - \log p_2}{\log p_1 - \log p_3}.$$

При опыте давления p_1 и p_3 мало отличаются от атмосферного. Поэтому можем написать $p_1 = p_2 \pm h_1$; $p_3 = p_2 \pm h_2$, где h_1 и h_2 маленькие величины по сравнению с p_2. Разложив логарифмы в ряд и беря приближенно только два первых члена, получим:

$$\varkappa = C_p/C_v = \frac{h_1}{h_1 - h_2}.$$

Ход работы

1. Вызвать в баллоне изменение давления вдувая или высасывая воздух через кран В. Это нужно сделать осторожно, не поднимая уровня керосина в манометре выше красной черты. Вследствие изменения давления в баллоне изменилась вместе с тем и температура.

2. Чтобы получить давление в баллоне при комнатной температуре, нужно подождать минут — 10, пока температура в баллоне сравняется с комнатной температурой.

3. После этого отсчитать h_1.

4. Открыть полностью на момент (0,2—0,5 сек) клапан А.

Как сказано выше, изменение давления в баллоне во время открытия клапана происходит адиабатически, ибо — 0,2—0,5 секунды слишком малый промежуток времени для того, чтобы мог произойти заметный теплообмен с окружающей средой и стенками самого баллона.

5. Подождать минут 10, пока воздух в баллоне примет комнатную температуру.

6. Отсчитать h_2.

Опыт следует повторить по меньшей мере 3 раза и вычислить арифметическое среднее.

Определение относительной плотности пара методом Виктора Мейера

Если при давлении H (мм рт. столба) и температуре t объем массы газа m будет V_1, то его плотность

$$\varrho = \frac{m}{V_1}. \qquad (1)$$

Так как объем газов (и паров) значительно зависит от температуры и давления, то их дают при так называемых «нормальных условиях», т. е. при 0°C и 760 мм давления ртутного столба.

Пусть при нормальных условиях объем газа будет V_0, тогда

$$V_0 = V_1 \cdot \frac{H}{760} \cdot \frac{1}{1+\alpha t}, \qquad (2)$$

где α коэффициент расширения газов.

Из уравнений (1) и (2) следует, что при нормальных условиях плотность

$$\varrho_0 = \frac{m}{V_0} = \frac{m}{V_1} \cdot \frac{760}{H}(1+\alpha t). \qquad (3)$$

Масса 1 $см^3$ газа (пара) при нормальных условиях выражается очень малым числом; поэтому целесообразно сравнивать их плотности с плотностью какого-нибудь общеизвестного газа, напр. водорода или чаще — сухого воздуха.

При нормальных условиях плотность сухого воздуха

$$\varrho_1 = 0{,}00129 \frac{г}{см^3}.$$

Тогда согласно (3), если $\alpha = 0{,}004$ (что соответствует приблизительно коэффициенту расширения воздуха при комнатной температуре и относительной влажности около 70%), относительная плотность выразится:

$$d = \frac{\varrho_0}{\varrho_1} = \frac{m}{V_1} \cdot \frac{1+0{,}004\,t}{0{,}00129} \cdot \frac{760}{H} \qquad (4)$$

где d означает относительную плотность исследуемого газа и является числом отвлеченным.

Задача

Определить плотность пара этилового эфира относительно плотности воздуха по методу Виктора Мейера.

Прибор Мейера для определения относительной плотности пара состоит из стеклянного сосуда «b», помещенного в металлический цилиндр «a», что представляет из себя водяную баню, нижняя часть которой до крана U_2 наполнена водой. Таким образом верхняя часть цилиндра «a» наполняется парами кипящей воды, которые выходят через отверстие U_1. Из сосуда «b» ведет стеклянная трубка «c», продолженная резиновой трубкой, в ванну «e», где помещается наполненная водой и перевернутая открытым концом вниз мензурка m, имеющая шкалу в $см^3$.

Испытуемая жидкость (эфир) вводится в сосуд «b» в стеклянной ампулке.

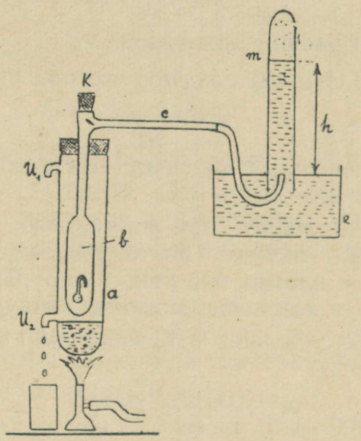


Рис. 21

Выполнение работы

а) Наполнение ампулки и ее взвешивание

Прежде всего определяется вес пустой стеклянной ампулки (P_1) на аналитических весах. После этого ампулка наполняется эфиром следующим образом: конец трубки ампулы помещается в маленький сосуд, наполненный эфиром, а шарик ампулы нагревается паром, выходящим из аппарата. При этом воздух

в ампулке вследствие повышения температуры начинает расширяться и выходить. Если удалим ампулку из струи пара, оставляя открытый конец в эфире, то воздух, охлаждаясь в ампулке, сжимается, и эфир входит в нее под давлением внешней атмосферы. Так проделывают до тех пор, пока ампулка не наполнится вся. Когда ампулка наполнена, трубку ампулы запаивают на остром пламени или просто при помощи спички. При этом ампулку надо окутать в промоченную холодной водой тряпку или вату и, пронеся быстро через огонь трубку ампулы, удалить из трубки эфир, и затем, нагрев кончик трубки, запаять.

Теперь взвешиваем ампулку вместе с эфиром (P_2), откуда вес эфира:

$$P = P_2 - P_1.$$

(Это будет в то же время масса эфира в граммах).

b) Заправка водяной бани

Открывая кран U_2, наливают в цилиндр воды до тех пор, пока вода начинает вытекать из крана U_2; затем закрывают кран U_2.

Стеклянный сосуд «b» необходимо вычистить от остатков стекол и прочих загрязнений. Затем сосуд «b» помещают в водяную баню и нагревают баню. Этим временем наполняется водой ванночка и мензурка, которую закрепляют в штатив открытым концом в ванночку. Когда из бани пойдет струя пара, то необходимо сосуд «b» продуть сухим воздухом. Для этого надо взять стеклянную трубку длинее сосуда «b», 6—8 мм диаметра, надеть на нее резиновый баллон и осторожно опустить конец трубки на дно сосуда «b».

Так как сосуд «b» теперь горячий, то воздух унесет последние следы эфира и влаги.

Теперь закрывают сосуд «b» пробкой и отвод «c» опускают в ванночку (но не под мензурку). Когда из отвода не будет больше выделяться пузырьков, то можем считать, что воздух в сосуде «b» нагрелся до 100°C. Отвод «c» подводят под мензурку возможно выше, но не выше уровня воды в ванночке.

c) Определение объема паров эфира

Открывают пробку «K», бросают в сосуд «b» ампулку, наполненную эфиром, и немедленно закрывают пробкой «K», прежде чем ампулка успеет разорваться. Вся эта манипуляция

должна производиться быстро; надолго пробку снимать нельзя, так как тогда в бане теплый воздух перемешается с холодным и его температура не будет 100°С, которую мы принимаем впоследствии при расчетах.

Благодаря нагреванию эфир, находящийся в ампуле, расширяется, разрывает ампулку и быстро обращается в пар. Пары жидкости вытесняют воздух из сосуда «b» и он в виде пузырьков выходит в мензурку m.

Когда выделение пузырьков прекратится, вынимают резиновую трубку из-под мензурки m, открывают пробку «К» и только тогда прекращают нагревание бани. Если прекратить нагревание и оставить отвод «с» в воде, то воздух в сосуде «b» вследствие охлаждения сжимается и вода из ванны втягивается в сосуд, отчего стеклянный сосуд обычно лопается.

После этого надо подождать (около 5 минут), пока воздух в мензурке m примет комнатную температуру. Тогда по шкале определяют объем воздуха V в $см^3$ и высоту h столба воды в мм (над уровнем воды в ванне).

Затем определяют по термометру комнатную температуру t и давление атмосферы p в торрах.

Вычисление производится по формуле (4), где $H = p - \frac{h}{13{,}6}$, так как столб воды h в мензурке m уменьшает давление воздуха над ним на $\frac{h}{13{,}6}$ торр, где h в мм, m в граммах, а V в $см^3$.

Таблица результатов измерений

№№ п/п	Наименование величины	Символ	Значение величины
1	Масса пустой ампулки	m_1	. . . . . мг.
2	Масса наполненной ампулки	m_2	. . . . . мг.
3	Масса эфира $(m_2 - m_1) \cdot 0{,}001$	m	. . . . . г.
4	Объем воздуха в мензурке	V	. . . . . $см^3$
5	Атмосферное давление (по барометру)	p	. . . . . торр
6	Высота водяного столба в мензурке	h	. . . . . мм
7	Температура воздуха в мензурке (комнатная температура)	t	. . . . . °С

8	Водяной столб уменьшает давление в мензурке на $\frac{h}{13{,}6}$ торр	$\frac{h}{13{,}6}$	. . . . . торр
9	Относительная плотность паров эфира при 0°С и давлении 760 торр	d	. . . . . (с точностью до 0,1).

Определение теплопроводности

1. Приборы и принадлежности.

Прибор для определения теплопроводности, пластинка из испытуемого вещества, милливольтметр, провода для соединений, микрометр и секундомер или часы.

2. Задание. Определить теплопроводность данной пластинки.

3. Основные теоретические сведения.

Количество тепла, прошедшее через слой вещества толщиной l при равномерном изменении температуры на этой длине с t_2 до t_1 при площади сечения слоя S за время $d\tau$ дается формулой Фурье:

$$dQ = \lambda S \frac{t_2 - t_1}{l} d\tau. \qquad (1)$$

Величина $\frac{t_2 - t_1}{l}$ есть изменение температуры на единицу длины и называем ее градиентом температуры.

Величина λ — называется коэффициентом теплопроводности или удельной теплопроводностью, которая характеризует теплопроводность данного вещества и измеряется количеством тепла, проходящим в единицу времени через слой толщиной в одну единицу и площади сечения в одну единицу, если градиент температуры 1° на ед. толщины. В системе CGS единица удельной теплопроводности $\frac{\text{калория см}}{\text{сек. см}^2 \text{ град.}} = \frac{\text{калория}}{\text{сек. см град.}}$.

В технике применяют единицу к. кал/град. м час.

4. Описание прибора и его теория.

Описываемый прибор предназначен для определения теплопроводности плохих проводников тепла.

Прибор состоит из двух частей, верхней и нижней (рис. 21). Верхняя часть (А) представляет термостат в виде цилиндрического сосуда, наполненного водой. Боковая поверхность сосуда обогревается током так, что вода кипит и поддерживает таким

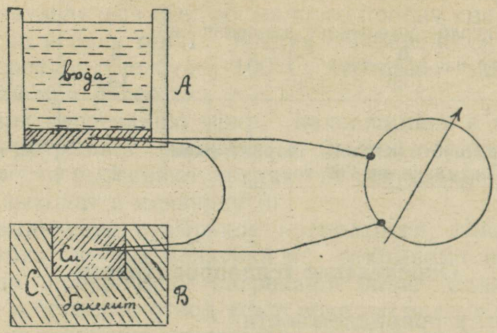


Рис. 22

образом постоянную температуру 100°С. Дно термостата из красной меди, наружная поверхность его очень ровная, чтобы достичь весьма плотного контакта с измеряемой пробой. В дне термостата помещается один спай термоэлемента. Нижняя часть содержит массивный цилиндр (С) из красной меди, который окружен бакелитовой массой для лучшей изоляции. В середине медного цилиндра С помещается второй спай термоэлемента.

При проведении опыта верхнюю часть прибора поднимают на штативе возможно выше. Нижнюю часть закрывают изолирующим слоем (например тетрадью). Затем включают ток. Когда вода закипит, то это означает, что дно термостата приняло температуру 100°С, в то время как медный цилиндр С имеет комнатную температуру. Теперь можно начать измерения. К концам термоэлемента подключают милливольтметр. На нижнюю часть вместо тетради ложат измеряемую пластинку и ставят на нее термостат. Вследствие наличия разности температур между дном термостата и медным цилиндром С, тепло будет переходить из термостата в медный цилиндр С и разность температур будет вследствие нагревания медного цилиндра С уменьшаться. Чем больше теплопроводность испытуемой пластины, чем она тоньше, тем быстрее будет нагреваться медный цилиндр С и тем быстрее будет уменьшаться эдс термоэлемента. По скорости изменения разности температур медного цилиндра С и термостата можно определить коэффициент теплопроводности λ. Для этого надо знать, по какому закону увеличивается температура медного цилиндра С со временем.

Для вывода этого закона исходим из формулы (1). В любой момент времени за промежуток времени $d\tau$ через измеряемую пластинку в медный цилиндр С перейдет количество тепла

$$dQ=\lambda S\frac{t_2-t_1}{l}d\tau, \qquad (1a)$$

где теперь S — сечение медного цилиндра, С, l — толщина измеряемой пластинки, t_2 — температура термостата и t_1 — температура цилиндра С.

Вследствие этого тепла температура медного цилиндра поднимается на dt, и мы можем записать тепло dQ по хорошо известной из калориметрии формуле:

$$dQ=cMdt, \qquad (2)$$

где c — удельная теплоемкость медного цилиндра С,
M — масса цилиндра.

Милливольтметр термопары дает отброс (N), пропорциональный разности температур

$$t_2-t_1=aN. \qquad (3)$$

Так как $t_2=$ const., то dt будет в то же время уменьшением разности температур

$$-d(t_2-t_1)=dt=-d(aN)=-adN. \qquad (3a)$$

Приравняв правые части выражений (1а) и (2) и заменив из (3) и (3а) температуру показанием гальванометра, получим

$$cMdN=\lambda S\frac{N}{l}d\tau. \qquad (4)$$

Константа а сокращается. Выражение (4) есть обыкновенное дифференциальное уравнение, где переменную N (отброс гальванометра целесообразно рассматривать как функцию времени τ. Переменные легко разделяются.

Перенесем N в левую часть. В правой оставим $d\tau$ и перенесем туда все константы; получим:

$$\frac{dN}{N}=-\frac{\lambda S}{cMl}d\tau=-Ad\tau. \qquad (5)$$

Интегрируем обе стороны уравнения в пределах $\tau=0$ ($N=N_0$) до τ ($N=N$).

$$\int_{N_0}^{N}\frac{dN}{N}=-A\int_{0}^{\tau}d\tau;\ \ln N-\ln N_0=-A\tau.$$

Перейдем к десятичным логарифмам и решим уравнение относительно $\log N$:

$$\log N=\log N_0-\frac{A}{2{,}303}\tau=\log N_0-m\tau \qquad (6)$$

В координатах $\log N$ и τ это уравнение представляет прямую с наклоном $-m$. Если на основании опытных данных построить прямую (6) и определить m, то имея в виду, что

$$m=\frac{A}{2{,}303}=\frac{\lambda S}{2{,}303\cdot cMl}, \qquad (7)$$

можно вычислить удельную теплопроводность:

$$\lambda=\frac{2{,}303\ mcMl}{S}, \qquad (8)$$

так как в (8) все величины легко измерить.

Выполнение работы

1. Приподнять сосуд с водой на максимальную высоту.
2. Чтобы нижний блок не нагрелся до начала измерений от верхнего блока, их надо изолировать каким-нибудь теплоизолятором.
3. Налить в сосуд термостата столько воды, чтобы уровень поднялся до 2—3 см от края и включить ток.
4. Соединить термоэлемент с милливольтметром (плюс с плюсом и минус с минусом).
5. Когда вода закипит и показания милливольтметра больше не увеличиваются, удаляем от аппарата все лишние вещи, кладем испытуемую пластинку (напр. картон) на нижний блок и спускаем термостат до плотного соприкосновения с пластинкой. Показания милливольтметра начнут падать. Показания милливольтметра протоколируем через каждые 2 минуты.

Результаты опыта заносим в следующую таблицу.

Время τ (мин.)	Показание милливольтметра N (микроамперметра)	log N
0 мин.		
2 „		
4 „		
30 „		

По данным этой таблицы строим график $\log N$ — τ. График не получается прямой, как этого требует уравнение (6), а в виде кривой. При выводе формулы (6) мы считали, что все тепло dQ идет на нагревание медного цилиндра. Однако, как только температура медного цилиндра станет выше комнатной, тепло начинает уходить через изоляцию цилиндра, и тем быстрее, чем выше температура цилиндра. Вследствие этого скорость уменьшения разности температур будет меньше, чем требует уравнение (6). Следовательно условия нашей теории выполняются только в самом начале опыта, когда температура медного цилиндра еще мало отличается от комнатной. Значит правильную величину наклона мы получим у касательной к началу графика. Касательные в других точках графика дают меньшее значение m.

Далее надо измерить толщину измеряемой пластинки и занести в следующую таблицу.

№	Наименование величины	Символ	Численная величина и единицы
1	Диаметр медного цилиндра С	D	4,38 см
2	Площадь —„—	S	15,2 см²
3	Масса —„—	M	403,7 г
4	Удельная теплоемкость —„—	c	0,092 $\frac{\text{кал}}{^\circ\text{С.г}}$
5	Толщина пластинки	l	. . . . . см
6	Подъем кривой	m	. . . . . $\frac{1}{\text{сек}}$

По данным этой таблицы при помощи формулы (8) вычисляем λ и выражаем ее в единицах CGS и технических.

Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости.

Свободный поверхностный слой жидкости ведет себя как натянутая резиновая пленка. Это свойство поверхностного слоя жидкости называют поверхностным натяжением. Поверхностное натяжение характеризуется т. н. коэффициентом поверхностного натяжения α, который измеряется силой в динах, действующей на 1 см. длины края поверхности жидкости. Величину этой силы можно прямо измерить весами.

Обозначим длину тонкого проволочного кольца l. Подвесим кольцо к пружинным весам и поставим под кольцо сосуд с исследуемой жидкостью, например с дистиллированной водой, так чтобы кольцо касалось поверхности жидкости. Опускаем медленно сосуд с жидкостью до тех пор, пока кольцо не оторвется от поверхности жидкости. Отсчитаем максимальное растяжение пружины в этот момент. Пусть это будет N.

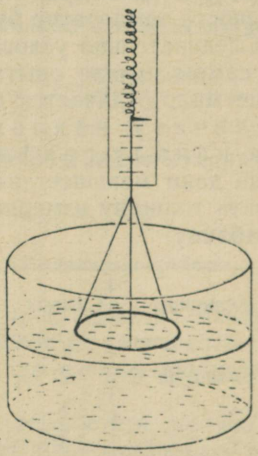


Рис. 23, Определение поверхностного натяжения.

Зная силу p в граммах, соответствующую одному делению шкалы, мы можем найти силу, необходимую для разрыва поверхностной пленки между кольцом и поверхностью жидкости.

$$F = 981\ pN\ дин.$$

Так как на 1 см. длины краевой линии действует сила в α дин, тогда по всей длине кольца действует сила $2l\alpha$ дн. Здесь взята двойная длина кольца, так как при отрывании кольца от жидкости мы имеем дело с двумя поверхностными слоями (двумя поверхностями пленки жидкости). Следовательно в момент отрыва кольца

$$2l\alpha = F, \text{ откуда } \alpha = \frac{F}{2l} = \frac{981\,pN\ дн.}{2l\ см.} \qquad (1)$$

Опыт надо повторить по меньшей мере 10 раз, взять из полученных отсчетов шкалы арифметическое среднее, т. е.

$$N = \frac{N_1 + N_2 \ldots + N_{10}}{10}$$

и подставить это значение в формулу для вычисления.

Так как поверхностное натяжение зависит от температуры жидкости (при повышении температуры поверхностное натяжение уменьшается), то надо вместе со значением коэффициента поверхностного натяжения дать и температуру, при которой проводилось измерение.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Краткие сведения из теории весов	3
Правила взвешивания	6
I-ое упражнение	6
II-е упражнение	9
Вторая работа с аналитическими весами	12
Третья работа с аналитическими весами	17
Общие измерения	21
Определение удельного веса жидкости весами Вестфаля и Мора	31
Определение коэффициента внутреннего трения (вязкости) воды по Пуазейлю	33
Определение модуля Юнга методом растяжения	36
Определение удельной теплоемкости твердого тела	39
Определение механического эквивалента теплоты при помощи прибора Каллендера	42
Определение скрытой теплоты парообразования воды	49
Определение модуля сдвига	51
Вискозиметр Кэмпфа	57
Определение отношений удельных теплоемкостей C_p/C_v газа методом Клемана и Дезорма	60
Определение относительной плотности пара методом Виктора Мейера	63
Определение теплопроводности	67
Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости	72

Редактор А. Альтма
Технический редактор А. Тамм
Корректор Ы. Каар

Подписано в печать 9 окт. 1964 г.
Бумага 60х84, 1/16.
Печ.л. 4,75 Условн.печ.л. 4,51
Тираж 1000 экз.Зак. № 272
[redacted]
Цена 14 коп

Цена 14 коп

X
A-7983

TÜ RAAMATUKOGU
1 0300 00463830 2