Министерство образования и науки Украины
Донбасская государственная машиностроительная академия

В.Г.Белых,
Р.А. Демедюк,
В.М.Костенко,
В.Н.Тулупенко,
О.С.Фомина

МЕХАНИКА. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

к лабораторным работам по дисциплине «Физика»
(для студентов всех специальностей вуза)

Издание второе, переработанное и дополненное

Утверждено на заседании
ученого совета ДГМА
Протокол № от г.

Краматорск 2015

УДК 535
ББК 22.33
М 55

Рецензенты:

Левченко Г.Г., доктор физ.–мат. наук, зав. Отделом фазовых превращений Физико–технического института НАН Украины, г.Донецк;

Надточий В.А., доцент, зав. кафедрой физики Славянского государственного педагогического университета

Наведені короткі теоретичні відомості, описи приладів, порядок виконання робіт, рекомендації щодо обробки результатів вимірювань. Для самоконтролю під кінець кожної роботи надані контрольні запитання.

М 55. Механика. Молекулярная физика и термодинамика: Методическое пособие к лабораторным работам по дисциплине «Физика» (для студентов всех специальностей вуза)/ В.Г.Белых, Р.А.Демедюк, В.М.Костенко, В.Н.Тулупенко, О.С.Фомина. – 3-е изд., перераб. и доп. – Краматорск: ДГМА, 2015. – 80 с.
ISBN

Приведены краткие теоретические сведения, описания установок, порядок выполнения работ, рекомендации по обработке результатов измерений. Для самоконтроля в конце каждой работы даны контрольные вопросы.

УДК 535
ББК 22.33
ISBN

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Лабораторный практикум играет большую роль в изучении курса общей физики. Можно выделить три основных его цели:

1) ознакомление с приборами и методами измерения различных физических величин;
2) экспериментальное изучение физических законов и явлений;
3) ознакомление с методами обработки результатов измерений.

Для выполнения конкретной лабораторной работы студент обязан заранее внимательно ознакомиться с содержанием методических указаний к ней; выучить надлежащий теоретический материал и проконтролировать себя с помощью контрольных вопросов. Наибольшее внимание, по крайней мере во время подготовки к выполнению, необходимо обратить на исследовательский прием, его суть, математическую обработку и его экспериментальную реализацию, то есть на ход выполнения работы.

Студент считается подготовленным к выполнению лабораторной работы, если он:

1) имеет экземпляр протокола исследования (см. ниже);
2) знает цель работы, может раскрыть содержание понятий, которые воссоздают цель работы;
3) проявит понимание того, как можно достичь цели этой работы, то есть знает суть экспериментального исследовательского приема, принцип действия экспериментальной установки и ход выполнения работы.

После получения разрешения на выполнение работы студент выполняет ее, занося соответствующие результаты в протокол исследования, проводит соответствующие вычисления и после получения итогового результата сдает протокол исследования преподавателю.

В протокол исследования заносятся:

1) номер и название лабораторной работы, фамилия, имя и отчество исполнителя, шифр академической группы, дата выполнения (эти данные приводятся на титульной странице протокола);
2) цель работы;
3) схематическое изображение экспериментальной установки или рабочие схемы;
4) основные расчетные формулы;

5) таблицы для результатов измерений и расчетов;
6) формулы для вычисления погрешностей и оценки результатов.

Оставляют место для необходимых расчетов и записи окончательного результата исследования. Конечный результат записывается в стандартной форме (см. ниже). Если необходимо представить результаты измерений в виде графической зависимости, то оставляют место для графиков. Построение графиков выполняется на миллиметровой бумаге.

Отчет должен быть написан в хорошем стиле, аккуратным разборчивым почерком. При его оформлении не следует также пренебрегать и эстетической стороной вопроса. Схемы и графики чертятся карандашом под линейку, заголовки, выводы и формулы целесообразно выделять пастой другого цвета, подчеркнуть и т. п. Это облегчает чтение отчета.

Для получения зачета по текущей лабораторной работе студент должен также изложить теорию экспериментального метода и теорию изученного явления или соответствующего раздела физики (давая ответы на контрольные вопросы).

1 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА N11
ЗНАКОМСТВО С ТЕОРИЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ

Цель работы: овладеть техникой измерения линейных размеров тел, изучить правила теории измерений и приобрести практические умения в оформлении и оценке результатов измерений.

1.1 Краткие теоретические сведения

Выполнение лабораторных работ сопровождается измерениями физических величин. Физическая величина является количественной мерой отдельных качеств физического явления или физического тела. Физические величины могут быть измерены. Измерить физическую величину означает сравнить ее с однородной ей величиной, которая выбрана в качестве единицы измерения.

Все единицы физических величин стандартизованы и сгруппированы в международную систему единиц **SI**, которая включает в себя основные и производные единицы. Основными являются те единицы, для которых существуют эталоны. Основными единицами в механике являются - метр (***м)***, килограмм (***кг)*** и секунда (***с)***; вспомогательными - радиан (***рад)***, стерадиан (***стер)***, остальные единицы производные.

Прямым называется измерение, в результате которого искомое значение величины находят непосредственно с помощью измерительного прибора (микрометра, линейки, амперметра, термометра и т.п.).

Косвенным называется измерение, при котором искомое значение находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям (пример – определение плотности тела по его геометрическим размерам и массе).

Измерения физических величин никогда не позволяют определять их истинные значения. Результат каждого измерения отличается от истинного значения измеряемой величины вследствие погрешностей измерения. Погрешности измерений по характеру и причинам их появления делятся на случайные, систематические и промахи.

Систематические погрешности приводят к одинаковому отклонению измеряемой величины от истинного значения при всех измерениях. Они возникают из-за использования на практике измерительных приборов, которые отличаются от эталонных, а также неточных или упрощенных методов измерений. Систематические погрешности могут быть уменьшены путем замены используемого прибора на прибор более высокого класса точности или уточнением метода измерений.

Промахи характеризуются явным и лишенным физического смысла отклонением записанного значения от других результатов измерений. Эти значения не повторяются при повторных измерениях и должны после проверки отбрасываться. Эти ошибки связаны, как правило, с невнимательностью экспериментатора.

Случайные погрешности характеризуются одинаковой вероятностью уменьшения и увеличения на некоторую величину результата измерения по отношению к истинному значению измеряемой величины. Случайные погрешности обусловлены несовершенством конструкции используемых приборов, ограниченностью органов чувств и скоростью реакции экспериментатора, а также влиянием случайных факторов, учет которых невозможен. Они могут быть уменьшены, но полностью устранить их невозможно.

Благодаря тому, что случайные погрешности подчиняются законам вероятности, их можно учесть и определить пределы, в которых находится истинное значение измеренной величины. С этой целью приборы для прямых измерений выбираются настолько чувствительные, чтобы повторные измерения одной и той же величины при неизменных условиях опыта давали отличающиеся результаты.

Пусть $\boldsymbol{a_1, a_2, a_3, \ldots, a_N}$ – значения величины $\boldsymbol{a}$, полученные в результате серии измерений. Сделав достаточно большое число измерений, можно убедиться, что вероятности появления различных значений величины $\boldsymbol{a}$ отличаются, и наиболее вероятным значением величины $\boldsymbol{a}$ является среднее арифметическое:

$$\langle \boldsymbol{a} \rangle = \frac{\boldsymbol{a_1 + a_2 + a_3 + \ldots + a_N}}{\boldsymbol{N}} . \qquad (1.1)$$

Точность проведенных измерений характеризуется абсолютной и относительной погрешностями измеренной величины.

Абсолютной погрешностью данного измерения называется абсолютное значение разности среднего значения измеренной величины и результата данного измерения:

$$\left.\begin{aligned}\Delta a_1 &= |\langle a\rangle - a_1|,\\ \Delta a_1 &= |\langle a\rangle - a_2|,\\ &\dots\dots\dots\dots,\\ \Delta a_1 &= |\langle a\rangle - a_n|.\end{aligned}\right\} \tag{1.2}$$

Абсолютной погрешностью измеренной величины называется среднее арифметическое абсолютных погрешностей всех измерений:

$$\Delta a = \frac{\Delta a_1 + \Delta a_2 + \Delta a_3 + \ldots + \Delta a_N}{N}. \tag{1.3}$$

Если произведено только одно измерение или все измерения дали одинаковые результаты, абсолютная погрешность считается равной приборной погрешности.

Приборная погрешность определяется по классу точности прибора (электроизмерительные приборы) или приравнивается к половине цены наименьшего деления шкалы прибора.

Относительной погрешностью измеренной величины называется отношение абсолютной погрешности к среднему значению измеренной величины:

$$\varepsilon = \frac{\Delta a}{\langle a\rangle}. \tag{1.4}$$

Относительную погрешность в конечном результате измерений принято выражать в процентах, для чего она определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{\Delta a}{\langle a\rangle} 100\%. \tag{1.5}$$

Окончательный результат измерений записывается в виде

$$a = \langle a\rangle \pm \Delta a, \tag{1.6}$$

что является краткой формой записи выражения

$$(\langle a\rangle - \Delta a) < a < (\langle a\rangle + \Delta a).$$

Предполагается, что истинное значение измеренной величины находится в указанном интервале.

Описанный выше метод определения погрешностей применяется также при косвенных измерениях, если они проводятся при изменяющихся условиях опыта.

Косвенные измерения предполагают, что некоторая величина x вычисляется по формуле

$$x = f(a, b, c, \ldots), \tag{1.7}$$

где величины ***a, b, c,*** ... - данные, полученные при прямых измерениях, справочные данные или же числовые коэффициенты. Эти величины, за исключением числовых коэффициентов, есть приближенные числа, поэтому и значение определяемой величины ***x*** также есть величина приближенная. В качестве наиболее вероятного значения вычисляемой величины <***x***> принимается значение функции от измеренных величин:

$$\langle x \rangle = f(\langle a \rangle, \langle b \rangle, \langle c \rangle, \ldots). \tag{1.8}$$

Погрешность косвенного измерения Δ***x*** есть следствие влияния на результат вычисления погрешностей аргументов, то есть величин Δ***a,*** Δ***b,*** Δ***c,***... .

При вычислении погрешностей величин, полученных в косвенных измерениях, исходят из того, что они значительно меньше самих величин (Δ***a***<< <***a***>, Δ***b***<< <***b***>, Δ***c***<< <***c***>,...), и потому влияние их можно оценивать по законам дифференциального исчисления. Абсолютная погрешность величины ***x*** определяется по формуле дифференциала функции ***f***(***a,b,c,...***):

$$\Delta x = \left|\frac{\partial f}{\partial a}\right|_{\substack{a=\langle a \rangle \\ b=\langle b \rangle \\ c=\langle c \rangle}} da + \left|\frac{\partial f}{\partial b}\right|_{\substack{a=\langle a \rangle \\ b=\langle b \rangle \\ c=\langle c \rangle}} db + \left|\frac{\partial f}{\partial c}\right|_{\substack{a=\langle a \rangle \\ b=\langle b \rangle \\ c=\langle c \rangle}} + \ldots, \tag{1.9}$$

где знаки модулей учитывают невозможность взаимного ослабления влияния случайных погрешностей аргументов функции. Вероятность взаимного усиления влияния равна вероятности его взаимного ослабления, и мы должны определять максимальную возможную погрешность.

Рассмотрим важные примеры применения формулы (1.9)

$$\left.\begin{aligned} x &= a + b, \\ \langle x \rangle &= \langle a \rangle + \langle b \rangle, \\ \Delta x &= \Delta a + \Delta b; \end{aligned}\right\} \tag{1.10}$$

$$\left.\begin{aligned} x &= a - b, \\ \langle x \rangle &= \langle a \rangle - \langle b \rangle, \\ \Delta x &= \Delta a - \Delta b; \end{aligned}\right\} \tag{1.11}$$

$$\left.\begin{aligned} x &= ln(a), \\ \langle x\rangle &= ln(\langle a\rangle), \\ \Delta x &= \frac{\Delta a}{\langle a\rangle} = \varepsilon_a . \end{aligned}\right\} \qquad (1.12)$$

Пример с формулами (1.12) показывает, что абсолютная погрешность натурального логарифма равна относительной погрешности его аргумента. Это позволяет использовать равенство логарифма произведения (отношения) алгебраической сумме логарифмов сомножителей (числителя и знаменателя) для нахождения с помощью формул (1.10), (1.11) и (1.12) относительных погрешностей произведения и дроби в примерах:

$$\left.\begin{aligned} x &= ab, \\ \langle x\rangle &= \langle a\rangle\langle b\rangle, \\ \varepsilon_x &= \frac{\Delta x}{\langle x\rangle} = \frac{\Delta a}{\langle a\rangle} + \frac{\Delta b}{\langle b\rangle} = \varepsilon_a + \varepsilon_b ; \end{aligned}\right\} \qquad (1.13)$$

$$\left.\begin{aligned} x &= \frac{a}{b}, \\ \langle x\rangle &= \frac{\langle a\rangle}{\langle b\rangle}, \\ \varepsilon_x &= \frac{\Delta x}{\langle x\rangle} = \frac{\Delta a}{\langle a\rangle} + \frac{\Delta b}{\langle b\rangle} = \varepsilon_a + \varepsilon_b . \end{aligned}\right\} \qquad (1.14)$$

При записи результаты измерений и вычислений следует округлять, оставляя в числах только те цифры, которые несут информацию.

Значащими цифрами числа называются все отличные от нуля цифры и все нули, слева от которых есть отличные от нуля цифры. Примеры:

3,1416 - пять значащих цифр;
450 - три значащих цифры;
0,045 - две значащих цифры;
0,0300 - три значащих цифры.

Значащие цифры результата измерения или вычисления разделяются на достоверные, недостоверные и сомнительные. Сомнительная цифра стоит в разряде, соответствующем старшему разряду абсолютной погрешности. Достоверные цифры стоят слева от нее, недостоверные – справа.

Правила округления:

1) Окончательный результат измерения или вычисления округляется до сомнительной цифры, недостоверные цифры отбрасываются.
2) Если первые две значащие цифры абсолютной погрешности в сумме больше пяти, она округляется с увеличением до одной значащей цифры. Если сумма равна пяти или меньше, округление производится с увеличением до двух значащих цифр.
3) Если округление результата и абсолютной погрешности должно производиться до разряда старшего, чем единицы, то в запись следует ввести множитель, т.е. использовать экспоненциальную форму записи чисел. Показатель степени $\boldsymbol{N}$ выбирается таким, чтобы результат имел порядок единицы. Результат и погрешность должны иметь одинаковый множитель, вынесенный при записи за скобку.
4) Множитель 10^N с отрицательным показателем степени следует также использовать, если результат по величине меньше одной сотой, чтобы избежать записывания большого числа нулей, не являющихся значащими цифрами.
5) При записи промежуточных результатов вычислений число значащих цифр в них должно превышать максимальное число значащих цифр в исходных данных на два, остальные должны отбрасываться.
6) Абсолютная погрешность табличных значений физических и математических величин считается равной половине единицы младшего разряда (следствие правил округления). Абсолютная погрешность точно известных коэффициентов считается равной нулю.

Часто целью лабораторной работы является исследование зависимости одной физической величины от другой, которую целесообразно изобразить на графике.

При построении графиков необходимо соблюдать ряд правил:

1) На листе бумаги стандартного размера очертить поле графика, оставив по левую сторону 15-20 мм, снизу - 20-25 мм. Ограничивающие поле графика линии могут служить координатными осями.
2) На осях необходимо нанести масштабную сетку, указать единицы измерения и символы изображаемых величин. При этом обязательным является требование, чтобы график занимал по возможности полно-

стью координатное поле. Иногда для этой цели бывает удобно сместить вдоль осей начало отсчета.

Масштаб по осям ***X*** и ***У*** может быть различен.

3) Отложить на координатном поле все точки, которые отвечают экспериментальным значениям. Точки следует наносить с максимальной точностью так, чтобы они четко выделялись на фоне графика, не сливаясь с ним.
4) Построить плавную лекальную кривую, которая проходит максимально близко ко всем точкам. Убедиться, что данная кривая не противоречит физическому закону.

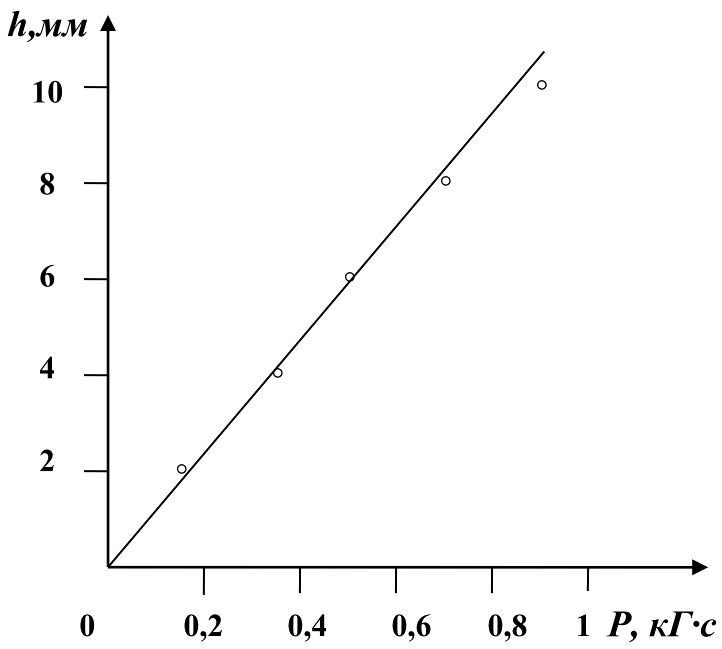


Рисунок 1.1 - Пример построения графика по экспериментальным точкам

1.2 Упражнения на закрепление навыков, умений работы с приближенными числами

Задание 1. Правила работы с приближенными числами

1) В таблице 1.1 даны результаты и погрешности измерения. Выбрав свой вариант задания, округлить результат измерений и сделать его запись в стандартном виде.
2) Воспользовавшись вариантом из таблицы 1.2, определить погрешность записанного числа и найти приблизительное значение заданного выражения.

Таблица 1.1

№	x_1	x_2	x_3	Δx_1	Δx_2	Δx_3
1	48,758	0,4897	5000	±0,57	±0,0065431	±898
2	57,396	0,2645	6000	±0,51	±0,0072241	±454
3	68,794	0,5678	7000	±0,73	±0,0015237	±391
4	59,904	0,6778	8000	±0,62	±0,0016371	±451
5	30,301	0,7891	9000	±0,31	±0,0037213	±991
6	42,944	0,9871	10000	±0,92	±0,0037313	±392
7	44,932	0,3456	1000	±0,63	±0,0038413	±464
8	53,919	0,4567	2000	±0,47	±0,0039141	±596
9	58,118	0,5781	3000	±0,42	±0,0039942	±696
10	10,009	0,5671	4000	±0,36	±0,0041444	±796
11	14,112	0,7764	5000	±0,24	±0,0056789	±888
12	19,384	0,6631	16000	±0,32	±0,0013456	±858
13	20,292	0,7131	17000	±0,44	±0,0024213	±799
14	25,901	0,3161	18000	±0,99	±0,0031414	±561
15	74,104	0,3269	19000	±0,47	±0,0031418	±459
16	82,202	0,3368	15000	±0,39	±0,0014148	±779
17	103,101	0,3468	14000	±0,05	±,0018191	±768
18	99,909	0,3596	13000	±0,74	±0,0019191	±661
19	109,901	0,5771	12000	±0,11	±0,0021901	±899
20	108,756	0,7157	11000	±0,94	±0,0010901	±669
21	107,944	0,7761	11500	±0,34	±0,0030133	±559
22	108,805	0,7651	11600	±0,29	±0,0017771	±668
23	13,001	0,6157	11700	±0,14	±0,0029193	±761
24	14,356	0,5731	11800	±0,91	±0,0031414	±999
25	19,319	0,5738	11900	±0,84	±0,0032122	±861
26	20,316	0,8167	12100	±0,77	±0,0016119	±558
27	21,391	0,3391	13100	±0,39	±0,0091327	±341
28	21,391	0,7196	14100	±0,45	±0,0091327	±532
29	22,292	0,6671	15100	±0,39	±0,0027327	±339
30	26,396	0,7382	16100	±0,42	±0,0037372	±724
31	27,804	0,3776	17100	±0,37	±0,0029237	±560
32	39,919	0,6226	18100	±0,02	±0,0037129	±932

Таблица 1.2

№	*Найти погрешность*	*Вычислить*
1	R=8,31 Дж/(К·моль)	$4 \cdot R \cdot 5{,}342 \cdot 2{,}43 \approx$
2	к=1,38 Дж/К	$4k \cdot 6{,}824 \cdot 1{,}43 \approx$
3	$F=9{,}65 \cdot 10^{7}$ Кл/моль	$2F \cdot 6{,}07 \cdot 1{,}277 \approx$
4	$e=1{,}60 \cdot 10^{-19}$ Кл	$2e \cdot 3{,}101 \cdot 2{,}104 \approx$
5	$m_e=9{,}11 \cdot 10^{-31}$ кг	$2m_e \cdot 4{,}03 \cdot 2{,}102 \approx$
6	$c=3{,}00 \cdot 10^{8}$ м/с	$2c \cdot 11{,}103 \cdot 14{,}02 \approx$
7	$\sigma=5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К²)	$\sigma \cdot 1{,}102 \cdot 10{,}3 \approx$
8	$b=2{,}90 \cdot 10^{-3}$ м·К	$2b \cdot 1{,}102 \cdot 10{,}3 \approx$
9	$C_1=3{,}74$ Вт·м²	$2C_1 \cdot 3{,}144 \cdot 9{,}31 \approx$
10	$G=6{,}67 \cdot 10^{-7}$ м³/(кг·с³)	$3G \cdot 5{,}894 \cdot 1{,}104 \approx$
11	$h=6.63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с	$4h \cdot 6{,}427 \cdot 0{,}89 \approx$
12	$N_A=6{,}02 \cdot 10^{23}$ моль	$5N_A \cdot 9{,}148 \cdot 0{,}191 \approx$
13	$\hbar=1{,}05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с	$\hbar \cdot 2{,}794 \cdot 1{,}883 \approx$
14	$R=2.07 \cdot 10^{-18}$ c^{-1}	$2R \cdot 9{,}199 \cdot 1{,}01 \approx$
15	$a=5{,}29 \cdot 10^{-11}$ м	$6a \cdot 8{,}169 \cdot 3{,}19 \approx$
16	$\lambda_c=2{,}43 \cdot 10^{-12}$ м	$6\lambda_c \cdot 9{,}919 \cdot 1{,}101 \approx$
17	$e/m=1{,}76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг	$2e/m \cdot 4{,}199 \cdot 5{,}03 \approx$
18	$\mu_Б=9{,}27 \cdot 10^{-24}$ Дж/Тл	$7\mu_Б \cdot 9{,}144 \cdot 5{,}67 \approx$
19	$\varepsilon_0=8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м	$8\varepsilon_0 \cdot 6{,}667 \cdot 7{,}03 \approx$
20	$\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м	$10\mu_0 \cdot 3{,}966 \cdot 7{,}03 \approx$
21	$v_з=332$ м/с	$2v_з \cdot 6{,}293 \cdot 1{,}101 \approx$
22	$n_а=2{,}42$	$2n_а \cdot 7{,}372 \cdot 1{,}32 \approx$
23	$n_в=1{,}33$	$2n_в \cdot 8{,}974 \cdot 1{,}92 \approx$
24	$n_м=1{,}60$	$3n_м \cdot 1{,}199 \cdot 8{,}914 \approx$
25	$n_с=1{,}50$	$3n_с \cdot 2{,}199 \cdot 10{,}9 \approx$
26	$R_з=6{,}37 \cdot 10^{6}$ м	$2R_з \cdot 2{,}6 \cdot 10{,}6 \approx$
27	$m_з=5{,}98 \cdot 10^{24}$ кг	$2m_з \cdot 2{,}6 \cdot 10{,}66 \approx$
28	$R_{сол}=6{,}95 \cdot 10^{8}$ м	$5R_{сол} \cdot 5{,}391 \cdot 6{,}1 \approx$
29	$m_{сол}=1{,}98 \cdot 10^{30}$ кг	$7m_{сол} \cdot 2{,}01 \cdot 3{,}111 \approx$
30	$R_л=1{,}74 \cdot 10^{6}$ м	$R_л \cdot 2{,}713 \cdot 3{,}13 \approx$
31	$m_л=7{,}33 \cdot 10^{22}$ кг	$2m_л \cdot 7{,}824 \cdot 3{,}13 \approx$
32	$\varepsilon_в=81$	$2\varepsilon_в \cdot 3{,}465 \cdot 2{,}645 \approx$

Задание 2. Построение графиков

Воспользовавшись правилами, приведенными выше, построить график зависимости ***I=f(U)***, соответствующий своему варианту задания (таблица 1.3).

Таблица 1.3

№	***Значения для построения графиков***					
1	I (A)	5	7	10	12	16
	U (B)	30	37	50	67	80
2	I (A)	5,1	7,1	7,9	9,5	10
	U (B)	100	150	170	190	200
3	I (A)	25,5	40,2	45,2	53	60
	U (B)	50	80	90	110	120
4	I (A)	7	10	12	16	15
	U (B)	15	20	24	28	30
5	I (A)	10	12	15	16	18
	U (B)	20	26	30	31	36
6	I (A)	8	12	13	15	15
	U (B)	17	24	25	29	30
7	I (A)	5	5,6	6,2	6,5	7,3
	U (B)	100	110	125	130	145
8	I (A)	5	6	8,2	9	12,1
	U (B)	10	12	16	18	24
9	I (A)	5	6,5	8,8	10	12,5
	U (B)	11	13	17	20	25
10	I (A)	6	6,5	11,5	12,5	14,7
	U (B)	12	13	22	24	29
11	I (A)	5	7,5	11,5	12,5	14,7
	U (B)	10	15	22	30	32
12	I (A)	7	9	9,1	14,5	20
	U (B)	14	18	19	29	40
13	I (A)	10,5	12	17	20	20
	U (B)	21	25	34	39	40
14	I (A)	10	13,5	20	23,5	28
	U (B)	20	27	40	47	55

Продолжение таблицы 1.3

15	I (A)	20	25	37	47	50
	U (B)	40	50	70	90	100
16	I (A)	35	38	40	42	46
	U (B)	70	76	80	84	90
17	I (A)	35	39	46	48,5	50
	U (B)	70	78	90	97	100
18	I (A)	5	6	7,8	8,6	10
	U (B)	10	12	15	17	20
19	I (A)	17	18	19	21	23
	U (B)	34	36	39	42	45
20	I (A)	23	25	28	31	33
	U (B)	47	50	57	63	65
21	I (A)	2,5	3	3,3	3,6	3,9
	U (B)	50	60	66	70	76
22	I (A)	5	8,5	13	19	20
	U (B)	10	17	27	37	40
23	I (A)	7,5	8	10	10,5	12,5
	U (B)	15	17	19	21	25
24	I (A)	5,6	7	13	15	25
	U (B)	11	15	25	30	50
25	I (A)	3	6	7	8	10
	U (B)	7	12	15	17	20
26	I (A)	1,5	4	5	6	8
	U (B)	3	7	10	12	15
27	I (A)	5	6	8	8,5	9,5
	U (B)	100	120	150	170	180
28	I (A)	10	10,1	10,2	10,4	11
	U (B)	200	202	203	207	220
29	I (A)	5	5,5	6,7	6,8	7
	U (B)	106	110	130	135	140
30	I (A)	6,5	7	8	8,3	8,6
	U (B)	130	140	160	165	170
31	I (A)	8,5	9	10	10,3	10,5
	U (B)	170	180	200	205	210
32	I (A)	5	10,1	20,2	23	25
	U (B)	10	20	40	45	50

Задание 3. Вычисление погрешностей прямых и косвенных измерений

Дано тело в виде параллелепипеда (рис. 1.2).

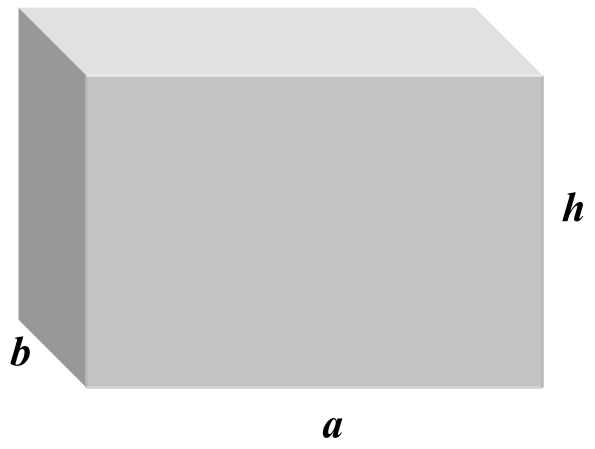


Рисунок 1.2

1) С помощью штангенциркуля измерить его линейные размеры. Полученные значения длины ***a***, ширины ***b*** и высоты ***h*** занести в табл. 1.4.
2) Вычислить среднее значение <*a*>:

$$\langle a \rangle = \frac{a_1 + a_2 + a_3}{3}$$

и результат занести в табл. 1.4.

Таблица 1.4

№ п/п	*a*	*Δa*	*b*	*Δb*	*h*	*Δh*	*v*	*Δv*
1								
2								
3								
Среднее								

3) Рассчитать абсолютные погрешности прямых измерений длины:

$$\Delta a_1 = \left| \langle a \rangle - a_1 \right|;$$
$$\Delta a_2 = \left| \langle a \rangle - a_2 \right|;$$
$$\Delta a_3 = \left| \langle a \rangle - a_3 \right|,$$

их среднее значение:

$$\langle \Delta a \rangle = \frac{\Delta a_1 + \Delta a_2 + \Delta a_3}{3}$$

и результаты занести в табл. 1.4.

4) Рассчитать относительную погрешность:

$$\varepsilon_a = \frac{\langle \Delta a \rangle}{\langle a \rangle}.$$

5) Аналогично вычисления сделать для средних значений ширины <***b***> и высоты <***h***>, записывая результаты вычислений в табл. 1.4.
6) Записать результаты прямых измерений в виде:

$$a=\langle a\rangle \pm \langle \Delta a\rangle;\ \varepsilon_a = \ldots\%.....$$

$$b=\langle b\rangle \pm \langle \Delta b\rangle;\ \varepsilon_b = \ldots\%...$$

$$h=\langle h\rangle \pm \langle \Delta h\rangle;\ \varepsilon_h = \ldots\%...$$

7) Вычислить значения объема параллелепипеда:

$$v=\langle a\rangle\ \langle b\rangle\ \langle h\rangle$$

и результат занести в табл. 1.4.

8) Вычислить относительную погрешность косвенных измерений объема:

$$\varepsilon = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta h}{h}.$$

9) Вычислить абсолютную погрешность вычисления объема:

$$\Delta v = \varepsilon \langle v\rangle$$

и результат занести в табл. 1.4.

10) Записать значения объема в виде:

$$v=\langle v\rangle \pm \langle \Delta v\rangle;\ \varepsilon = \ldots\%...$$

1.3 Контрольные вопросы

1 Сформулировать цель работы.
2 Что такое физическая величина и возможно ли измерить ее точное значение?
3 Какие погрешности измерений существуют?
4 Какие погрешности измерений называют случайными?
5 Что такое прямые и косвенные измерения и какие величины измерялись в работе как прямые, а какие как – косвенные?
6 Что такое абсолютная и относительная погрешности измерений и как они находятся в прямых и косвенных измерениях?
7 Что такое стандартная форма записи результата и что она отображает?

2 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12
ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАШИНЫ АТВУДА

Цель работы: изучить законы кинематики материальной точки, ознакомиться с устройством и принципом действия машины Атвуда, определить путь и скорость равномерного движения грузов, определить путь, мгновенную скорость и ускорение при равноускоренном движении грузов машины Атвуда.

2.1 Краткие теоретические сведения

Механическим движением называют изменение положения тела относительно других тел с течением времени. Определение положения движущегося тела относительно других тел в любой момент времени является основной задачей механики.

При описании механического движения прежде всего необходимо указать тело отсчета, т.е. тело, относительно которого рассматривается изменение положения движущегося тела. Затем необходимо выбрать способ определения положения тела относительно тела отсчета. Для решения этой задачи в механике вводятся математические модели материальной точки и абсолютно твердого тела. ***Материальной точкой*** называют тело, размерами которого в данных условиях можно пренебречь (например, в случае, когда размеры тела много меньше расстояний до других тел). При этом считают, что вся масса тела сосредоточена в одной точке. ***Абсолютно твердым телом*** называют тело, для которого расстояние между любыми двумя точками остается неизменным, т.е. в этом случае пренебрегают деформациями тела в процессе движения.

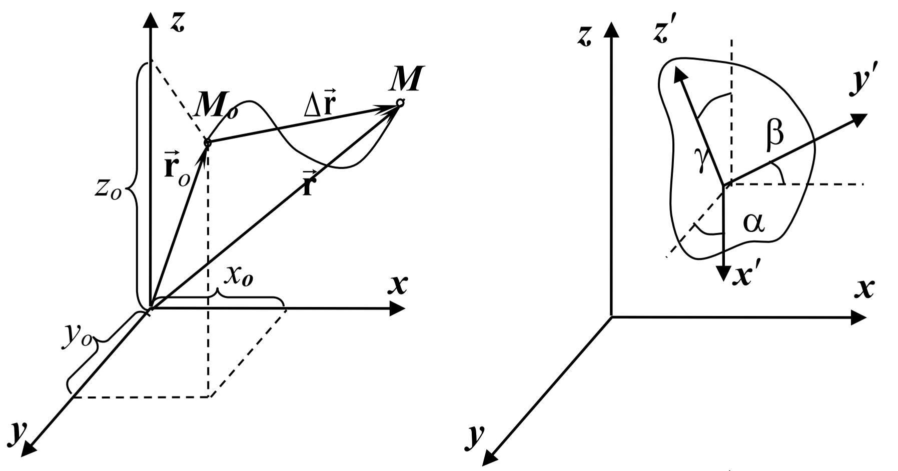
Положение движущейся материальной точки относительно точки отсчета определяют с помощью декартовой системы координат, начало которой связывают с телом отсчета. Тогда совокупность трех координат $\boldsymbol{x, y, z}$ (или радиус-вектор $\vec{r}$) однозначно определяет положение материальной точки в пространстве (рис.2.1,а). Положение абсолютно твердого тела задано, если известны координаты (или радиус-вектор $\vec{r}$) одной из точек тела и ориентация этого тела относительно осей координат (углы α, β, γ на рис. 2.1,б).

Тело отсчета, связанная с ним система координат и прибор для измерения времени (часы) образуют ***систему отсчета***.

С помощью системы отсчета положение движущегося тела определяется полностью. При дальнейшем рассмотрении ограничимся изучением движения материальной точки.

Воображаемая линия, которую описывает материальная точка при движении, называется ***траекторией***. Пусть материальная точка движется из начальной точки $\boldsymbol{M_0}$ в конечную точку $\boldsymbol{M}$ по кривой $\boldsymbol{M_0M}$. Расстояние, пройденное материальной точкой по ее траектории, т.е. длину дуги $\boldsymbol{M_0M}$ называют ***пройденным путем***, который обозначается буквой $\boldsymbol{s}$. Вектор, проведенный из начальной точки траектории в конечную, называется ***перемещением***. На рис. 2.1,а вектор перемещения обозначен как $\Delta\vec{r}$. Нетрудно видеть, что

$$\Delta\vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_o .$$



а б

Рисунок 2.1

Длина (модуль) вектора перемещения $|\Delta\vec{r}|$ в общем случае не равна пройденному пути. Эти величины совпадают только для прямолинейного движения без изменения направления движения. Из определения вектора перемещения имеем, что

$$\vec{r} = \vec{r}_o + \Delta\vec{r} ,$$

т.е. положение материальной точки в данной системе отсчета определено, если известны ее начальное положение – вектор $\vec{r}_o$ и перемещение $\Delta\vec{r}$. Уравнения зависимости радиуса-вектора от времени $\vec{r}(t)$ или, что то же самое, зависимости координат от времени: $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ - называют ***кинематическими уравнениями движения*** или просто уравнениями движения.

Изменение радиуса-вектора $\vec{r}$ с течением времени описывают с помощью векторной величины, называемой мгновенной скоростью.

Мгновенная скорость – это предел, к которому стремится отношение перемещения $\Delta\vec{r}$ к промежутку времени Δt, за которое это перемещение совершено, при стремлении Δt к нулю:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}.$$

Из курса математики известно, что такой предел представляет собой первую производную функции $\vec{r}(t)$ по аргументу $\boldsymbol{t}$. Поэтому

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \dot{\vec{r}}. \qquad (2.1)$$

Отметим, что векторное уравнение (2.1) представляет собой символическую запись трех скалярных уравнений для проекций вектора скорости:

$$v_x = \frac{dx}{dt},\ v_y = \frac{dy}{dt},\ v_z = \frac{dz}{dt},$$

где $\boldsymbol{x}$, $\boldsymbol{y}$, $\boldsymbol{z}$ **-** координаты материальной точки, т. е проекции радиуса-вектора $\vec{r}$ на оси декартовой системы координат. Величину (модуль) вектора скорости можно вычислить через проекции:

$$v = |\vec{v}| = \sqrt{v_x^{\,2} + v_y^{\,2} + v_z^{\,2}} = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} = \frac{\sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}}{dt} = \frac{\sqrt{ds^2}}{dt} = \frac{ds}{dt}$$

или как производную пройденного пути от времени (для бесконечно малого перемещения $|\Delta\vec{r}| = ds$). Вектор $\vec{v}$ направлен по касательной к траектории движения.

Если известна зависимость вектора скорости от времени, то радиус-вектор материальной точки находится из уравнения (2.1) путем интегрирования:

$$\vec{r} = \vec{r}_o + \int \vec{v}(t)\,dt. \qquad (2.2)$$

Для характеристики зависимости скорости от времени вводится вектор ***ускорения***:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\dot{\vec{r}}\right) = \ddot{\vec{r}}, \qquad (2.3)$$

который показывает, как быстро изменяется скорость движения. По известному ускорению материальной точки можно найти мгновенную скорость:

$$\vec{v} = \vec{v}_o + \int \vec{a}(t)dt, \tag{2.4}$$

где $\vec{v}_0$ - скорость в начале наблюдения (начальная скорость).

Формулы (2.4), (2.2) решают основную задачу механики в рамках кинематики. Проиллюстрируем это на конкретных примерах.

1) Равномерное прямолинейное движение

Равномерным прямолинейным движением называется движение, при котором и величина, и направление вектора скорости остаются постоянными: $\vec{v} = const$. Тогда из уравнения (2.2) получаем:

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}\int dt = \vec{r}_0 + \vec{v}t \, . \tag{2.5}$$

Отметим, что при прямолинейном движении направление одной из координатных осей декартовой системы координат удобно выбирать совпадающим с направлением движения. Тогда при движении тела изменяется только одна координата, а две другие остаются постоянными (рис. 2.2).

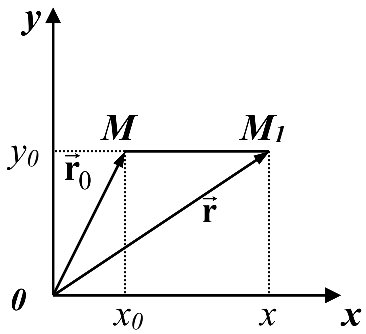


Рисунок 2.2

В проекциях на оси координат уравнение (2.5) примет вид:

$$\begin{cases} x = x_0 + v_x t, \\ y = y_0, \\ z = z_0. \end{cases} \tag{2.5a}$$

Формулы (2.5а) решают основную задачу механики в случае равномерного прямолинейного движения. Из уравнения (2.5) находим вектор перемещения:

$$\Delta\vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_o = \vec{v}\,t,$$

а из формул (2.5 а) – его проекции на оси координат:

$$\Delta x = x - x_o = v_x t \, .$$

Нетрудно видеть, что в этом движении модуль вектора перемещения равен пройденному пути:

$$|\Delta\vec{r}| = |\Delta x| = v\,t = s \, .$$

2) Равнопеременное прямолинейное движение

Равнопеременным называют движение, при котором величина и направление вектора ускорения не изменяются с течением времени: $\vec{a} = const.$ Из уравнения (2.4) находим зависимость вектора скорости от времени:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}\int dt = \vec{v}_0 + \vec{a}\,t \qquad (2.6)$$

Из формулы (2.6) видно, что для того, чтобы движение было прямолинейным, векторы $\vec{v}_0$ и $\vec{a}$ должны быть направлены вдоль одной прямой.

Если $\vec{v}_0$ и $\vec{a}$ направлены одинаково, то модуль скорости увеличивается:

$$v = v_0 + at$$

и движение называется ***равноускоренным.*** При противоположном направлении векторов $\vec{v}_0$ и $\vec{a}$ величина скорости уменьшается:

$$v = \left| \; v_0 - at \; \right|,$$

а движение называют ***равнозамедленным***.

Подставив выражение (2.6) в формулу (2.2), получим зависимость радиуса-вектора от времени:

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \int (\vec{v}_0 + \vec{a}\,t)dt = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a}\,t^2}{2}. \qquad (2.7)$$

Формула (2.7) дает решение основной задачи механики для равнопеременного движения. Перемещение материальной точки

$$\Delta\vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_0 = \vec{v}_0 + \frac{\vec{a}\,t^2}{2}. \qquad (2.8)$$

Модуль вектора перемещения совпадает с пройденным путем, если не изменяется направление движения:

$$|\,\Delta\vec{r}\,| = s = v_0 t \pm \frac{at^2}{2},$$

где знак «+» берется для равноускоренного движения, а знак «-» - для равнозамедленного.

2.2 Описание установки и метода измерений

Для измерений параметров движения в данной работе используется машина Атвуда (рис. 2.3).

Основой машины является корпус 1, на котором размещена шкала с сантиметровыми делениями. В верхней части корпуса крепится блок 2, через который перекинута нить с грузами 3, уравновешивающими один другого. На грузах изображены литеры П – правый и Л – левый. Необходимо придерживаться такого расположения грузов. Масса правого груза несколько больше массы левого, что позволяет компенсировать действие силы трения в блоке, благодаря чему грузы двигаются равномерно.

На корпусе находится подвижное кольцо 4, которое может быть закреплено в произвольном месте шкалы. На нем вмонтирован разомкнутый электрический контакт, включенный в электрическую цепь электронного секундомера.

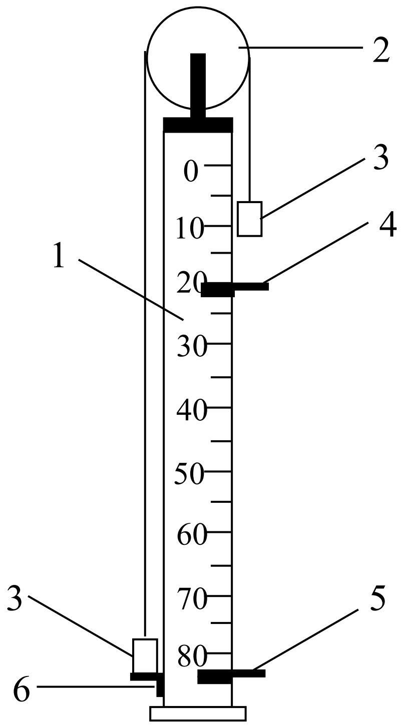


Рисунок 2.3

При замыкании контакта включается электронный секундомер, начиная отсчет времени. На корпусе закреплены также приемный столик 5 и упор 6 для левого груза. Приемный столик может перемещаться вдоль шкалы и фиксироваться в произвольном месте шкалы. В него вмонтирован выключатель электронного секундомера, который срабатывает от удара во время приема груза. К установке прилагается перегрузок в виде латунного диска с разрезом. Перегрузок размещается на правом грузе и во время прохождения кольца 4 остается на поверхности кольца, замыкая контакт для включения электронного секундомера.

Под действием перегрузка грузы двигаются равноускоренно. При прохождении кольца 4 перегрузок снимается, и грузы продолжают равномерное движение со скоростью, которую они приобрели за время ускоренного движения. Одновременно включается секундомер, который измеряет время равномерного движения между кольцом 4 и столиком 5.

Установка позволяет измерять путь s_1 укоренного движения от нулевого деления шкалы до деления, которое соответствует положению верхнего кольца 4, путь s_2 и время t_2 равномерного движения между кольцом 4 и столиком 5. Соответственно вычисляется скорость равномерного движения:

$$v_2 = \frac{s_2}{t_2}. \qquad (2.9)$$

Эта скорость является также максимальной скоростью равноускоренного движения на пути s_1:

$$v_1 = v_2.$$

Так как это движение без начальной скорости $v_0=0$, то

$$v_1 = v_2 = at_1;$$

$$s_1 = \frac{at_1^2}{2},$$

где t_1 – неизвестное время на пути s_1. Из этих формул находим, что

$$t_1 = \frac{v_1}{a}, \qquad (2.10)$$

$$s_1 = \frac{av_2^2}{2a^2} = \frac{v_1^2}{2a},$$

или с учетом формулы (2.9)

$$s_1 = \frac{s_2^2}{2at_2^2},$$

откуда следует, что

$$a = \frac{s_2^2}{2s_1 t_2^2}. \qquad (2.11)$$

Формулы (2.10) и (2.11) являются расчетными для вычисления времени и ускорения в равноускоренном движении.

2.3 Порядок выполнения работы

Задание 1. Изучение равномерного движения

1 Закрепить подвижное кольцо на расстоянии 0,10 м от начала шкалы.

2 Закрепить приемный столик на расстоянии 0,23 м от начала шкалы и убедиться, что верхняя грань груза, который стоит на приемном столике, находится на расстоянии 0,20 м от начала шкалы и 0,10 м от подвижного кольца. Занести в таблицу 2.1 путь равномерного движения груза s=0,10 м.

3 Установить правый груз таким образом, чтобы его верхняя грань находилась против нулевой отметки шкалы. Нагрузить его перегрузком и успокоить колебания груза. Включить электронный секундомер и подготовить его к работе, воспользовавшись пере-

ключателем с надписью «сброс». Левый груз удерживается на упоре 6 (см. рис 2.3).

Таблица 2.1

№ п/п	*s, м*	*t, с*	*v, м/с*	*Δv, м/с*
1				
2				
3				
4				
5				
Среднее				

4 Освободить грузы и наблюдать за движением. После прохождения правого груза через кольцо 5 должен включиться секундомер, после удара груза о приемный столик 5 секундомер должен выключиться, останавливая отсчет времени. Если не произойдет нормального включения и выключения секундомера, проверить контакты и повторить эксперимент. Если секундомер срабатывает нормально, занести время движения груза в таблицу 2.1.

5 Сместить вниз приемный столик на 0,10 м и, повторяя действия пп. 2…4 соответственно для s = 0,30, 0,40, 0,50 м, результаты измерений записать в соответствующие места таблицы 2.1.

6 Вычислить по формуле (2.9) скорость равномерного движения для каждого из исследуемых путей. Теоретически это должен быть один и тот же результат. Найти его среднее значение как среднее арифметическое полученных значений скоростей.

7 Вычислить абсолютные погрешности для каждого из значений скорости и их среднее значение. Вычислить относительную погрешность.

8 Записать результат измерения скорости в стандартной форме.

9 Построить графики зависимости пути равномерного движения от времени.

Задание 2. Изучение закономерностей равноускоренного движения

1 Установить приемный столик на расстоянии 0,83 м от начала шкалы, что соответствует отсчету времени на конечной точке шкалы, верхней грани груза. Проверить справедливость этого.

2 Зафиксировать подвижное кольцо на расстоянии 0,10 м от начала шкалы. Проверить действие контактов. Занести в таблицу 2.2 соот-

ветственно значения путей s_1 = 0,10 м, пройденного при ускоренном движении, и s_2 = 0,70 м, пройденного при равномерном движении.

3 Зафиксировать упор 6 (см. рис. 2.3), таким образом, чтобы при нажатии на него левого груза верхняя грань правого находилась на нулевой отметке шкалы. Удерживая левый груз на упоре, поместить перегрузок на правом грузе. Успокоить колебания груза и сделать сброс показаний на электронном секундомере.

Таблица 2.2

№ п/п	s_2, м	t_2, с	V_2, м/с	s_1, м	t_1, с	a, м/с^2	Δa, м/с^2
1							
2							
3							
4							
5							
Среднее							

4 Освободить грузы и наблюдать их движение. По окончании записать время t_2 равномерного движения в таблицу 2.2.

5 Перемещая подвижное кольцо, провести соответствующие опыты для s_1 = 0,20 м, s_2 = 0,60 м; s_1 = 0,30 м, s_2 = 0,50 м; s_1 = 0,40 м, s_2=0,40 м. Соответствующие данные и результаты измерения времени t_2 равномерного движения на пути s_2 занести в таблицу 2.2.

6 Вычислить скорость равномерного движения v_2 (она же конечная скорость равноускоренного движения) по формуле (2.9).

7 Вычислить ускорение a равноускоренного движения по формуле (2.11). Теоретически вы должны получить одинаковое ускорение для всех пяти случаев, т.к. ускоряющий перегрузок во всех опытах один и тот же. Рассчитать среднее значение ускорения a как среднее арифметическое его значений. Данные занести в таблицу 2.2.

8 Вычислить абсолютные погрешности измерения ускорения как погрешности прямых измерений, среднее значение погрешностей и относительную погрешность измерений.

9 Записать значение ускорения в стандартной форме.

10 Определить время ускоренного движения по формуле (2.10) и занести его в таблицу 2.2.

11 Построить графики зависимостей мгновенной скорости $\boldsymbol{v_2}$ и пути $\boldsymbol{s_2}$ от времени движения $\boldsymbol{t_2}$.

2.4 Контрольные вопросы

1 Сформулировать цель работы.
2 Что называют механическим движением?
3 В чем заключается основная задача механики? Что означает изучить механическое движение с точки зрения классической механики?
4 В чем заключается принцип независимости движений, в чем его ценность?
5 Что такое материальная точка? Как можно задать положение материальной точки в пространстве?
6 Дать определение радиуса-вектора, перемещения, скорости и ускорения движения материальной точки. Как они связаны между собой?
7 Какое движение называют равнопеременным? Запишите формулы, описывающие равнопеременное движение.
8 Поясните устройство машины Атвуда. Как можно ее использовать для изучения равномерного и равнопеременного движения? Выведите расчетные формулы (2.9), (2.10) и (2.11).
9 Что такое абсолютная и относительная погрешность измерений и почему, на ваш взгляд, абсолютные погрешности скорости и ускорения вычисляются как погрешности прямых измерений в проведенных исследованиях?

3 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №13
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ СИЛЫ УДАРА

Цель работы: изучить законы динамики, а также законы сохранения импульса и энергии, познакомиться с теорией удара, определить среднюю силу удара стального шарика о металлическую плиту.

3.1 Краткие теоретические сведения

Из опыта известно, что изменение скорости тела, то есть появление ускорения, всегда происходит под воздействием на данное тело других тел. Для характеристики этих воздействий вводится понятие силы. Силой называют векторную величину, характеризующую такое действие на данное тело других тел, которое приводит к появлению ускорения и деформации тела. При действии одинаковых сил на различные тела скорости этих тел изменяются по-разному. Свойство тела сохранять свою скорость неизменной, если на него не действуют другие тела или действие других тел скомпенсировано, называется инертностью. Инертность тел приводит к тому, что мгновенно изменить скорость тела невозможно – действие на него другого тела должно длиться определенное время. Чем инертнее тело, тем меньше изменяется его скорость за данное время. Количественной мерой инертности является масса тела.

Понятия массы тела и силы, действующей на тело, позволяют количественно описывать взаимодействия различных тел. Основой для такого описания являются законы динамики (законы Ньютона).

Первый закон. Существуют такие системы отсчета, называемые инерциальными, относительно которых тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, если на него не действуют другие тела или действие других тел скомпенсировано.

Второй закон. Сила, действующая на тело, равна скорости изменения импульса этого тела:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}. \qquad (3.1)$$

Третий закон. Тела действуют друг на друга с силами, равными по величине и противоположными по направлению:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2. \qquad (3.2)$$

Инерциальные системы отсчета играют в механике очень важную роль. Во-первых, сами законы Ньютона справедливы только для инерциальных систем отсчета. Во-вторых, для инерциальных систем отсчета справедлив принцип относительности Галилея: все механические явления в инерциальных системах отсчета протекают одинаково. Первый закон Ньютона дает опытный критерий, позволяющий ответить на вопрос - является ли система отсчета инерциальной или нет.

Второй закон Ньютона является основным в динамике. Используя определение импульса тела $\vec{p} = m\vec{v}$, уравнение (3.1) можно переписать в виде

$$\vec{F} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = m\frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{a}$$

или

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \qquad (3.3)$$

Из уравнения (3.3) следует, что ускорение, получаемое телом, является откликом на внешнее воздействие. Величина этого отклика (ускорения $\vec{a}$) зависит как от внешнего воздействия (силы $\vec{F}$), так и от самого тела (массы m). Так как $\vec{a} = \ddot{\vec{r}}$, то уравнение (3.3) есть дифференциальное уравнение второго порядка относительно функции $\vec{r}(t)$. Решение этого уравнения дает решение основной задачи механики – определения положения тела в любой момент времени. Если на данное тело действуют одновременно несколько других тел, то есть несколько сил, то под силой $\vec{F}$ в уравнениях (3.1), (3.3) надо понимать равнодействующую всех этих сил:

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i.$$

В настоящей работе определяется сила, действующая на стальной шарик при ударе о стальную плиту. Ударом называют кратковременное взаимодействие двух тел. Если известна зависимость импульса от времени $\vec{p}(t)$ хотя бы для одного из соударяющихся тел, то силу удара можно определить из уравнения (3.1). Однако экспериментальный метод, предложенный в работе, не дает такой возможности. В работе определяется полное изменение импульса $\Delta\vec{p} = \vec{p}_2 - \vec{p}_1$ и время τ, за которое это изменение произошло, то есть время удара.

По этим данным можно определить среднюю силу удара:

$$\vec{F}=\frac{\Delta\vec{p}}{\tau}=\frac{\vec{p}_2-\vec{p}_1}{\tau}. \tag{3.4}$$

Для нахождения изменения импульса шарика $\Delta\vec{p}=\vec{p}_2-\vec{p}_1$ рассмотрим центральный абсолютно упругий удар шарика массой $\boldsymbol{m}$ о неподвижное тело массой $\boldsymbol{M}$ (рис. 3.1).

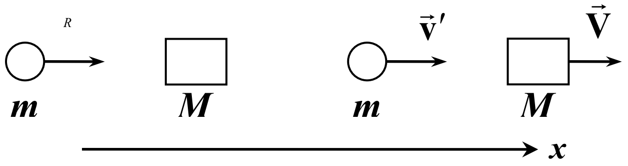


Рисунок 3.1

Удар называют центральным, если скорости соударяющихся тел направлены вдоль одной прямой, и удар называется абсолютно упругим, если механическая энергия тел не переходит в другие виды энергии. При таком ударе кинетическая энергия соударяющихся тел полностью или частично переходит в потенциальную энергию упругой деформации. Затем тела возвращаются к первоначальной форме, отталкивая друг друга. При этом потенциальная энергия упругой деформации снова переходит в кинетическую, и тела разлетаются со скоростями, величина и направление которых определяются двумя условиями – сохранением полной энергии и импульса соударяющихся тел. Поэтому имеем два уравнения:

$$m\vec{v}=m\vec{v}\,'+M\vec{V}, \tag{3.5}$$

$$\frac{m\vec{v}^{\,2}}{2}=\frac{m(\vec{v}\,')^2}{2}+\frac{M\vec{V}^{2}}{2}, \tag{3.6}$$

где $\vec{v}$ и $\vec{v}\,'$ - скорости шарика до столкновения и после него; $\vec{V}$ - скорость тела массой $\boldsymbol{M}$ после удара по нему шарика. Уравнение (3.5) есть закон сохранения импульса, а уравнение (3.6) – закон сохранения механической энергии для ситуации, показанной на рис. 3.1. Решение уравнений (3.5), (3.6) относительно переменных $\vec{v}\,'$ и $\vec{V}$ приводит к выражениям:

$$\vec{v}\,'=\frac{(m-M)\vec{v}}{m+M}, \tag{3.7}$$

$$\vec{V}=\frac{2m\vec{v}}{m+M}. \tag{3.8}$$

С помощью формул (3.7), (3.8) можно определить скорость шара до удара о неподвижное тело, которое можно рассматривать как тело бесконечно большой массы.

При $M\to\infty$ из выражений (3.7), (3.8) получаем:

$$\vec{v}' = -\vec{v}, \quad \vec{V} = 0, \tag{3.9}$$

то есть скорость шара меняет направление на противоположное, но не изменяется по величине. Используя равенства (3.9), находим, что изменение импульса шара после абсолютно упругого удара о неподвижное тело равно $\Delta\vec{p} = -2m\vec{v}$ и выражение (3.4) для средней силы удара принимает вид

$$\vec{F} = \frac{-2m\vec{v}}{\tau},$$

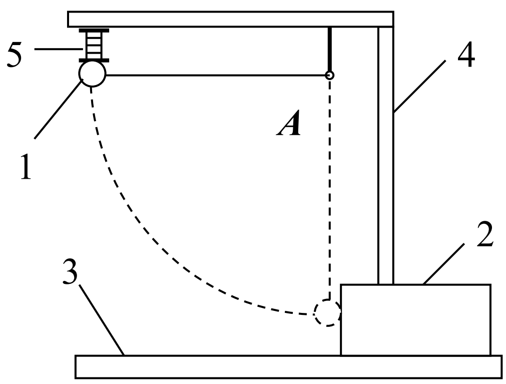
или в скалярном виде:

$$F = \frac{2mv}{\tau}. \tag{3.10}$$

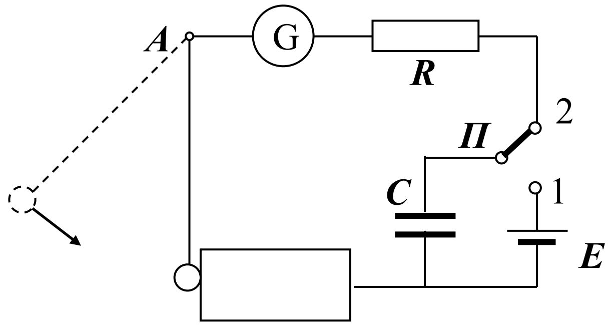
Формула (3.10) является расчетной в данной лабораторной работе.

3.2 Описание установки и метода измерений

Для реализации метода используется экспериментальная установка, схематическое изображение которой приведено на рис. 3.2. Исследуется удар между шариком 1 (рис. 3.2, а) и массивным телом в виде цилиндра 2. Цилиндр расположен на плите 3. Стальной шарик подвешен шарнирно в точке ***A*** с помощью гибкого проводника на штативе 4. На этом же штативе закреплен электромагнит 5. При прикосновении шарика к электромагниту его центр тяжести находится на уровне шарнира ***A***.



а



б

Рисунок 3.2

Электрическая цепь установки (см. рис. 2,б) предназначена для определения времени продолжительности удара шарика о цилиндр и для питания электромагнита. Питается цепь от батареи ***E*** (или от сети переменного тока через выпрямитель).

Время продолжительности удара определяется как время разрядки конденсатора при соприкосновении шарика и цилиндра. Измерения заряда конденсатора и известный закон его разрядки позволяют определить время разрядки и тем самым время продолжительности удара.

Конденсатор $\boldsymbol{C}$ включен параллельно батарее $\boldsymbol{E}$; его включение и размыкание осуществляются переключателем $\boldsymbol{\Pi}$, который имеет два положения, обозначенных на схеме цифрами 1 и 2. В положении 1 конденсатор получает некоторый заряд $\boldsymbol{Q}$, причем одновременно включается электромагнит, который может удерживать шарик в верхнем положении (см. рис. 3.2,а). Перевод переключателя в положение 2 выключает питание электромагнита и освобождает шарик, одновременно включая конденсатор в цепь, состоящую кроме конденсатора из резистора сопротивлением $\boldsymbol{R}$, баллистического гальванометра $\boldsymbol{G}$, гибкого проводника, шарика и цилиндра. Эта цепь замыкается только во время контакта шарика с цилиндром, то есть во время удара.

Разряд конденсатора происходит по закону

$$I = -\frac{dq}{dt} = \frac{U}{R},$$

где $U = q/C$ - напряжение на конденсаторе. Скорость изменения заряда на конденсаторе равна:

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{1}{RC}q. \tag{3.11}$$

Уравнение (3.11) представляет собой дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными. Интегрирование дает такой результат:

$$\int_{Q}^{q'} \frac{dq}{q} = -\frac{1}{RC}\int_{0}^{\tau} dt \Rightarrow \tau = RC\,ln\frac{Q}{q'}, \tag{3.12}$$

где $\boldsymbol{Q}$ - начальный заряд конденсатора, который измеряется по отклонению стрелки баллистического гальванометра при полной разрядке конденсатора (шарик касается цилиндра, а переключатель $\boldsymbol{\Pi}$ находится в положении 2); $\boldsymbol{q'}$ - заряд, который останется на конденсаторе после окончания контакта шарика с цилиндром при ударе. Заряд $\boldsymbol{q'} = \boldsymbol{Q} - \boldsymbol{q}$, где $\boldsymbol{q}$ – заряд, который пройдет через баллистический гальванометр во время удара.

Цена деления гальванометра (баллистическая постоянная) - β, поэтому $Q = \beta n_0$, а $q = \beta n$, где n_0 и n - соответствующие отклонения стрелки баллистического гальванометра при полной разрядке конденсатора и во время удара. Время удара шарика определяется по формуле

$$\tau = RC\,ln\frac{n_0}{n_0 - n}. \qquad (3.13)$$

Если считать, что удар шара о плиту абсолютно упругий, то скорость шара перед ударом можно найти из закона сохранения энергии:

$$mgh = \frac{mv^2}{2}. \qquad (3.14)$$

Учитывая, что в начальном состоянии (см. рис. 3.2,а) $h = l$, из уравнения (3.14) получаем формулу для определения скорости шара:

$$v = \sqrt{2gl}. \qquad (3.15)$$

3.3 Порядок выполнения работы

1 Изучить экспериментальную установку и записать в табл. 3.1 значения массы шара m, емкости конденсатора C и сопротивления цепи R.

2 Измерить с помощью линейки с миллиметровой шкалой расстояние от точки подвеса до центра шарика и результат занести в табл. 3.1.

3 Включить установку в сеть на *220 В* и проверить работоспособность всех ее систем: электромагнит должен притягивать шарик в положении переключателя “зарядка” и освобождать в положении “разряд”; конденсатор должен заряжаться и разряжаться, а гальванометр должен давать соответствующие отклонения стрелки.

4 Переключатель из положения “заряд” перевести в положение “разряд”, когда шарик находится в контакте с цилиндром. Зафиксировать отклонения стрелки гальванометра n_0. Опыт повторить 5 раз, найти среднее значение n_0 и записать его в табл. 3.1.

Таблица 3.1

L, м	*v, м/с*	*m, кг*	*C, Ф*	*R, Ом*	n_0

5 Установить переключатель в положение “заряд”, и привести шарик в соприкосновение с нижней поверхностью сердечника электромагнита.
6 Перевести переключатель в положение “разряд” и зафиксировать максимальное отклонение $\boldsymbol{n}$ стрелки гальванометра. При этом нельзя допускать повторные удары шарика о цилиндр. Опыт повторить 5 раз. Данные наблюдений занести в табл. 3.2.

Таблица 3.2

№ опыта	n	τ, с	F, кН	ΔF, кН	ε
1					
2					
3					
4					
5					
Среднее:					

3.4 Обработка результатов исследования

1 Рассчитать по формуле (3.15) значение скорости шара и значение записать в таблицу 3.2.
2 Рассчитать по формуле (3.13) продолжительность удара $\boldsymbol{\tau}$ и занести в табл. 3.2.
3 Рассчитать для каждого из пяти случаев значение средней силы удара по формуле (3.10). Рассчитать среднее значение силы для пяти результатов как среднее арифметическое. Результаты вычислений занести в табл. 3.1.
4 Вычислить абсолютные погрешности измерения средней силы удара как погрешности прямых измерений.
5 Вычислить относительную погрешность измерений, воспользовавшись средними значениями силы $\boldsymbol{F}$ и абсолютной погрешности $\Delta\boldsymbol{F}$.
6 Записать результат измерения в стандартной форме.

3.5 Контрольные вопросы

1 Сформулировать основные законы механики Ньютона. Границы их применимости.
2 Дать определения силы и массы тела. В каких единицах они измеряются?

3 Что такое импульс тела? Привести формулировку второго закона Ньютона, используя импульс тела.
4 Сформулировать закон сохранения импульса.
5 Дать определение механической, потенциальной и кинетической энергии тела. Привести примеры.
6 Что такое инерция тела? Привести примеры использования инерции тел.
7 Сформулировать закон сохранения и превращения механической энергии. В каких случаях его применение не имеет смысла?
8 Что представляет собой экспериментальная установка?
9 Почему в работе определяется средняя сила удара? В чем состоит исследовательский метод? Как определяется время удара? Как определяется изменение импульса? Вывести соответствующие расчетные формулы.
10 Почему при такой маленькой массе шарика вы получили довольно большое значение силы удара?

4 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №14
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ МАХОВИКА

Цель работы: изучить законы кинематики и динамики вращательного движения, установить зависимость углового ускорения от момента силы, определить момент инерции маховика.

4.1 Краткие теоретические сведения

Абсолютно твердым телом называется тело, деформацией которого в условиях данной задачи можно пренебречь. Расстояние между любыми двумя точками абсолютно твердого тела не изменяется при его движении.

Поступательным движением твердого тела называется такое его движение, при котором любая прямая, жестко связанная с телом, остается параллельной самой себе. При поступательном движении векторы скорости и ускорения всех точек твердого тела совпадают. Для описания поступательного движения твердого тела достаточно описать движение одной его точки (обычно выбирается центр масс).

Вращательным движением твердого тела называется такое его движение, при котором все точки тела движутся по дугам окружностей, а центры всех окружностей лежат на одной прямой, которая называется ***осью вращения***.

Всякое сложное движение твердого тела можно разложить на поступательное и вращательное. При этом ось вращения можно провести через любую точку тела (чаще всего она проводится через центр масс). Направление оси вращения при произвольном движении может изменяться, положение ее в каждый момент времени называется ***мгновенной осью вращения***.

Твердое тело, вращающееся вокруг неподвижной оси, имеет одну степень свободы. Его положение в пространстве полностью определяется величиной $\boldsymbol{\varphi}$ - ***углом поворота*** из начального положения. В кинематике вращательного движения угол поворота тела считается вектором, с его помощью задается направление оси вращения.

Вращательное движение в каждый момент времени характеризуется ***угловой скоростью***, которая равна первой производной угла поворота по времени:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}. \quad (4.1)$$

Как и угол поворота, угловая скорость считается вектором, направленным вдоль оси вращения. Векторы угла поворота и угловой скорости направлены вдоль оси так, чтобы из их концов вращение тела было видно происходящим против движения часовой стрелки, т.е. в соответствии с ***правилом правого винта или буравчика***, (рис. 4.1).

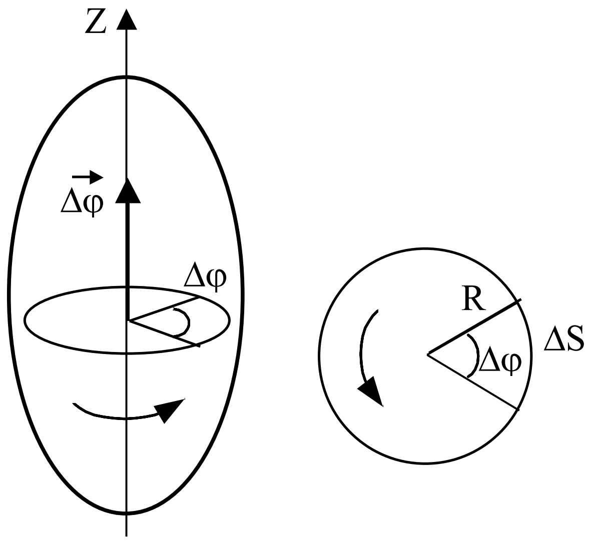


Рисунок 4.1

Равномерное вращение тела наблюдается, если численное значение его угловой скорости не изменяется с течением времени, т.е. ω=const. Тогда угол поворота линейно зависит от времени:

$$\varphi = \omega t. \quad (4.2)$$

Периодом обращения называется промежуток времени T, в течение которого тело, равномерно вращаясь с угловой скоростью ω, совершает один полный оборот (φ=2π):

$$T = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (4.3)$$

Частота вращения

$$n = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (4.4)$$

показывает число оборотов, совершаемых телом за единицу времени при равномерном вращении.

При неравномерном вращении тела вокруг неподвижной оси его движение характеризуется также ***угловым ускорением***

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}. \quad (4.5)$$

Угловое ускорение тоже считается вектором, направленным вдоль оси вращения. Его направление совпадает с направлением угловой скорости, если она увеличивается, и противоположно, если угловая скорость уменьшается.

Равнопеременное вращение тела наблюдается, если численное значение его углового ускорения не изменяется с течением времени, т.е. $\boldsymbol{\varepsilon = const}$. В этом случае зависимость от времени угловой скорости и угла поворота задается формулами:

$$\omega = \omega_0 + \varepsilon t \qquad (4.6)$$

$$\varphi = \omega_0 t + \frac{\varepsilon t^2}{2}, \qquad (4.7)$$

где ω_0 – значение угловой скорости в нулевой момент времени.

Величина линейной скорости произвольной точки твердого тела, вращающегося вокруг неподвижной оси, может быть определена по формуле

$$v = \omega R, \qquad (4.8)$$

где $\boldsymbol{R}$ – расстояние от точки до оси вращения. Направлена скорость по касательной к окружности, которую описывает точка. Величины тангенциального и нормального ускорений:

$$a_\tau = \varepsilon R, \qquad (4.9)$$

$$a_n = \omega^2 R. \qquad (4.10)$$

Моментом силы $\vec{F}$ относительно неподвижной точки (начала отсчета) называется векторная величина $\vec{M}$, равная векторному произведению радиуса-вектора точки приложения силы $\vec{F}$ на эту силу.

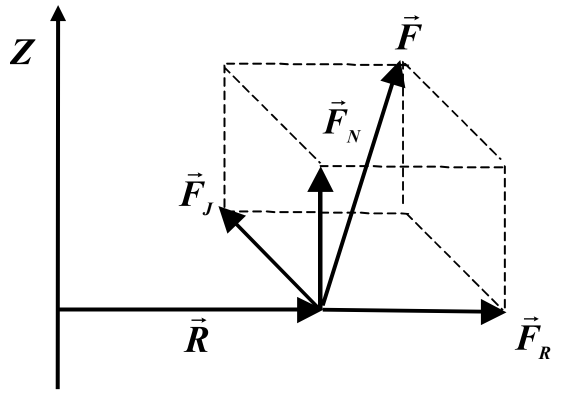


Рисунок 4.2

Моментом силы $\vec{F}$ относительно неподвижной оси $\boldsymbol{Z}$ называется скалярная величина M_Z, равная проекции на эту ось вектора $\vec{M}$ момента силы $\vec{F}$ относительно произвольной точки оси. Значение момента M_Z не зависит от выбора положения точки на оси. Величина момента силы относительно оси определяется формулой

$$M_Z = RF_\tau, \qquad (4.11)$$

где $\boldsymbol{R}$ – расстояние от оси до точки приложения силы, F_τ - составляющая силы, перпендикулярная оси и отрезку $\boldsymbol{R}$ (рис. 4.2).

Моментом импульса материальной точки относительно неподвижной точки (начала отсчета) называется векторная величина $\vec{L}$, равная векторному произведению радиуса-вектора $\vec{r}$, определяющего положение материальной точки, на ее импульс.

Моментом импульса системы материальных точек относительно неподвижной точки (начала отсчета) называется векторная сумма моментов импульса относительно этой точки всех материальных точек системы.

Моментом импульса системы материальных точек относительно неподвижной оси Z называется скалярная величина L_Z, равная проекции на эту ось вектора $\vec{L}$ момента импульса системы относительно произвольной точки оси. Значение момента L_Z не зависит от выбора положения точки на оси.

Производная момента импульса системы материальных точек по времени равна суммарному моменту внешних сил, действующих на систему.

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}. \tag{4.12}$$

Векторное соотношение (4.12) сохраняет свою силу и для проекций векторов на ось вращения Z.

Абсолютно твердое тело при описании его вращательного движения разделяется мысленно на столь малые части, что их можно считать материальными точками. Движение его описывается как движение системы материальных точек, все расстояния между которыми остаются неизменными. Для такой системы можно определить ***момент инерции*** относительно неподвижной оси вращения Z по формуле

$$J_Z = \sum_{i=1}^{N} m_i R_i^2, \tag{4.13}$$

где m_i – масса i-й части системы; R_i – расстояние от нее до оси вращения.

В случае твердого тела сумма преобразуется в интеграл по объему тела:

$$J_Z = \int_{(V)} R^2 \rho \, dV, \tag{4.14}$$

где ρ - плотность вещества. Момент инерции тела относительно произвольной оси можно выразить через момент инерции его относительно оси, проходящей через центр масс и параллельной данной, с помощью ***теоремы Штейнера:***

$$J_z = J_c + md^2, \tag{4.15}$$

где J_C – момент инерции относительно оси, проходящей через центр масс; m – масса тела; d – расстояние между осями. В табл. 4.1 приведены моменты инерции ряда симметричных тел, определенных по формуле (4.13).

Таблица 4.1

Тело	*Положение оси Z*	*Момент инерции J_z*
Полый тонкостенный цилиндр радиуса R и массы m	Ось цилиндра	mR^2
Сплошной цилиндр (диск) радиуса R и массы m	Ось цилиндра	$\frac{1}{2}mR^2$
Шар радиуса R и массы m	Ось, проходящая через центр шара	$\frac{2}{5}mR^2$
Тонкостенная сфера радиуса R и массы m	Ось, проходящая через центр сферы	$\frac{2}{3}mR^2$
Прямой тонкий стержень длины l и массы m	Ось, перпендикулярная стержню и проходящая через его середину	$\frac{1}{12}ml^2$
Прямой тонкий стержень длины l и массы m	Ось, перпендикулярная стержню и проходящая через его конец	$\frac{1}{3}ml^2$

Через момент инерции может быть выражен момент импульса вращающегося твердого тела относительно оси вращения Z, он равен:

$$L_z = J_z\omega. \tag{4.16}$$

Подстановка выражения (4.16) в формулу (4.12) позволяет получить ***основной закон динамики вращательного движения:***

$$\varepsilon = \frac{M_z}{J_z}, \tag{4.17}$$

соответствующий второму закону Ньютона для поступательного движения. Твердое тело, совершающее вращательное движение, обладает кинетической энергией:

$$T = \frac{J_z\omega^2}{2}. \tag{4.18}$$

4.2 Описание установки и метода измерений

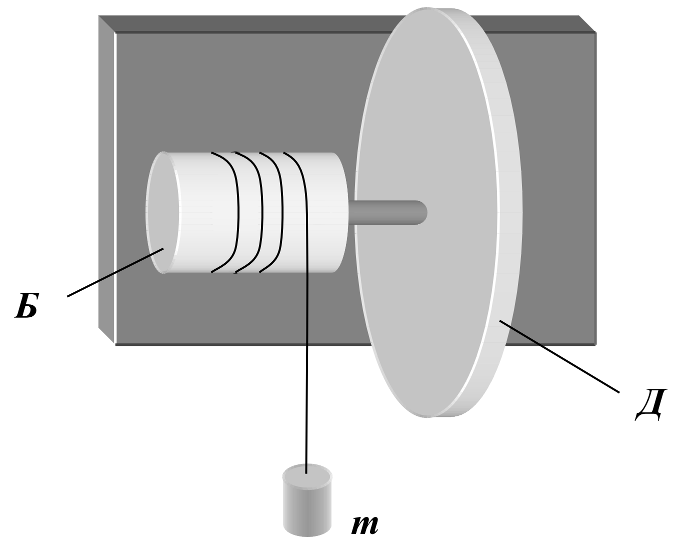


Рисунок 4.3

Маховик (рис. 4.3) представляет собой металлический диск ***Д***, плотно сидящий на валу. Концы вала проходят через подшипники в специальных опорах, благодаря чему вал может вращаться с очень малым трением. Центр масс маховика находится на оси вращения. На оси вращения закреплен пустотелый барабан ***Б***, на который наматывается нить. Один конец нити прикрепляется к барабану, к другому концу подвешивается груз массой ***m***, приводящий всю систему в равноускоренное движение. Величина углового ускорения маховика определяется основным законом динамики вращательного движения (4.17).

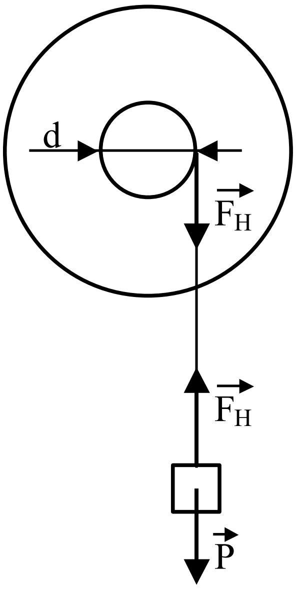


Рисунок 4.4

Непосредственно на барабан (рис. 4.4) действует сила натяжения $\boldsymbol{F_H}$, момент которой относительно оси вращения

$$\boldsymbol{M_H} = \boldsymbol{F_H R} = \frac{\boldsymbol{F_H\, d}}{\boldsymbol{2}}, \qquad (4.19)$$

где $\boldsymbol{d}$ – диаметр барабана. Кроме того, в подшипниках действует сила трения, момент которой $\boldsymbol{M_{TP}}$ направлен в противоположную сторону по отношению к $\boldsymbol{M_H}$. Суммарный момент сил относительно оси вращения:

$$\boldsymbol{M_Z} = \boldsymbol{M_H} + \boldsymbol{M_{TP}}. \qquad (4.20)$$

Из выражений (4.20) и (4.17) можно получить формулу для определения момента инерции:

$$\boldsymbol{J_Z} = \frac{\boldsymbol{M_H} - \boldsymbol{M_{TP}}}{\boldsymbol{\varepsilon}}. \qquad (4.21)$$

Груз движется с ускорением $\boldsymbol{a}$, которое можно определить, измеряя время опускания $\boldsymbol{t}$ грузов с высоты $\boldsymbol{h}$:

$$a = \frac{2h}{t^2}. \qquad (4.22)$$

По второму закону Ньютона $ma = P - F_H$, где P – величина веса груза, равная mg. Отсюда следует, что величина силы натяжения $F_H = m(g - a)$, момент этой силы задается формулой

$$M_н = \frac{m(g-a)d}{2}. \qquad (4.23)$$

Ускорение груза a равно по величине тангенциальному ускорению всех точек поверхности барабана, на который намотана нить. Это позволяет по формуле (4.9) найти угловое ускорение барабана и маховика:

$$\varepsilon = \frac{a}{R} = \frac{2a}{d}. \qquad (4.24)$$

4.3 Порядок выполнения работы

1 Измерить штангенциркулем и записать величину диаметра барабана d.

2 Прикрепить к свободному концу нити груз массой 0,050 кг и установить его с помощью линейки на высоте h = 1,00 м от пола. Измерить время t опускания груза с этой высоты, включая секундомер в момент освобождения груза и выключая его в момент касания пола. Результат записать в табл. 4.2.

Таблица 4.2

№	*m, кг*	*t, с*	*a, м/с²*	M_H*,Н·м*	*ε, рад/с²*	J_z*, кг·м²*	ΔJ_z*, кг·м²*
1	0,050						
2	0,100						
3	0,150						
4	0,200						
5	0,250						
6	0,300						
					Средние		

3 Описанные в пункте 2 измерения повторить для грузов с массами, заданными в табл. 4.2. Полученные значения t записать в табл. 4.2.

4 По формуле (4.22) вычислить шесть значений ускорения грузов и записать их в табл. 4.2.

5 По формуле (4.23) вычислить шесть значений момента силы натяжения $\boldsymbol{M_H}$ и записать их в табл. 4.2.
6 По формуле (4.24) вычислить шесть значений углового ускорения маховика $\boldsymbol{\varepsilon}$ и записать их в табл. 4.2.

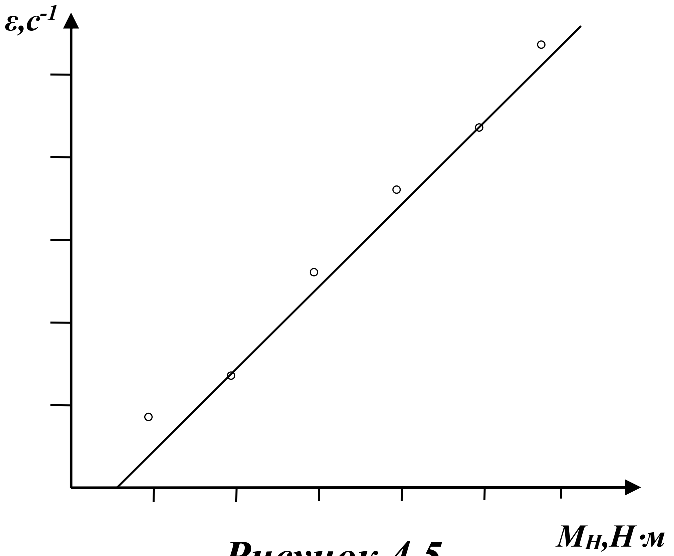


Рисунок 4.5

7 Построить график зависимости углового ускорения $\boldsymbol{\varepsilon}$ от момента силы натяжения $\boldsymbol{M_H}$ (образец приведен на рис.4.5). Продолжить прямую графика до пересечения с осью $\boldsymbol{M_H}$, точка пересечения соответствует величине момента силы трения $\boldsymbol{M_{TP}}$. Записать его значение.
8 По формуле (4.21) вычислить шесть значений момента инерции вращающейся системы $\boldsymbol{J_Z}$, записать их в табл. 4.2.
9 Закончить заполнение табл. 4.2 , вычислив и вписав в нее среднее значение момента инерции $\boldsymbol{J_Z}$, абсолютные погрешности шести измерений момента инерции, среднюю абсолютную погрешность.
10 Вычислить относительную погрешность определения момента инерции $\boldsymbol{J_Z}$, записать окончательный результат определения $\boldsymbol{J_Z}$ в стандартной форме.
11 Измерить диаметр и толщину маховика , вычислить его момент инерции по формуле из табл. 4.1. Плотность стали принять равной $7{,}85\cdot10^3$ ***кг/м³***. Сравнить результат вычислений с результатом измерений.

4.4 Контрольные вопросы

1 Что называется абсолютно твердым телом?

2 Какие движения может совершать абсолютно твердое тело?
3 Какое движение называется вращательным?
4 Какие величины характеризуют вращательное движение?
5 Что называется углом поворота?
6 Что называется угловой скоростью?
7 Чем отличается угловая скорость от средней угловой скорости?
8 Как зависит угол поворота от времени при равномерном вращательном движении?
9 Что называется угловым ускорением?
10 От чего зависят угловая скорость и угол поворота при равнопеременном вращательном движении?
11 Как связаны линейные скорости точек твердого тела с угловыми скоростью и ускорением?
12 Что называется моментом силы и моментом импульса относительно начала координат? Как они связаны?
13 Что называется моментом силы и моментом импульса относительно оси вращения?
14 Что такое момент инерции? Как он связан с моментом импульса?
15 Сформулировать основной закон вращательного движения.
16 Чему равна кинетическая энергия вращающегося тела?
17 Почему сила натяжения, раскручивающая маховик, отличается от веса груза?
18 Какие изменения энергии происходят в процессе раскручивания маховика?
19 По каким формулам определяется абсолютная погрешность отдельного измерения, средняя абсолютная погрешность, относительная погрешность измеренной величины?
20 Сколько значений относительной погрешности следует вычислить?
21 Сформулировать правила округления и записи конечного результата измерений и его абсолютной погрешности.

5 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №21

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ГАЗОВОЙ ПОСТОЯННОЙ

Цель работы: ознакомиться с законами идеального газа, уравнением Менделеева-Клапейрона и основным законом молекулярно-кинетической теории газов, опытным путем определить универсальную газовую постоянную.

5.1 Краткие теоретические сведения

Механика изучает движения тел, которые происходят из-за различных воздействий на них. Но внешние воздействия вызывают также изменения свойств тел, т.е. изменения их состояний. Эти свойства и их изменения изучаются в рамках молекулярной физики и термодинамики.

Молекулярная физика, она же статистическая физика и молекулярно-кинетическая теория, базируется на представлении, что все тела состоят из мельчайших, невидимых глазом частиц – молекул. Молекулы взаимодействуют между собой таким образом, что на больших расстояниях они притягиваются друг к другу, а на малых расстояниях – отталкиваются. Молекулы находятся также в состоянии непрерывного теплового движения. К таким представлениям физиков привело наблюдение многих физических явлений, из которых можно упомянуть растворение твердых тел и испарение жидкостей, диффузию, хаотическое (броуновское) движение малых, но наблюдаемых через микроскоп частиц в жидкостях и газах.

Число молекул в теле есть физическая величина, которая называется «количество вещества», обозначается она греческой буквой ν. Единица измерения количества вещества – моль. Число молекул в одном моле называется ***число Авогадро***. Его величина N_A=6,07·10^{23} моль$^{-1}$. Масса одного моля в граммах численно равна массе молекулы каждого вещества в атомных единицах массы. Обозначается масса моля $\boldsymbol{M}$.

В рамках ***термодинамики или термодинамического метода*** разработана система величин, задающих состояние тела и называемых параметрами состояния. К параметрам состояния относятся прежде всего ***масса тела m*** и его ***объем V***. Часто используется ***давление P***, которое численно равно отношению силы $\boldsymbol{dF_n}$, действующей на элементарный (бесконечно малый) участок поверхности тела перпендикулярно ему, к площади этого участка dS:

$$P = \frac{dF_n}{dS}. \qquad (5.1)$$

Единица измерения давления – паскаль (Па). Она соответствует действию силы в один ньютон на один квадратный метр поверхности тела.

Важнейшим параметром состояния является ***температура***. Изменение температуры сопровождается изменением практически всех характеристик тела, в частности изменяются размеры твердых и объемы жидких тел. Именно эти изменения положены в основу измерения температуры. При этом рабочее тело термометра, прибора для измерения температуры, приводится в контакт с исследуемым телом. В термодинамике установлено, что находящиеся в контакте тела обязательно приходят в состояние теплового равновесия, что подразумевает одинаковую температуру этих тел. Изменение объема жидкого рабочего тела особенно наглядно проявляется в изменении уровня жидкости в капилляре, соединенном с полностью заполненным жидкостью маленьким сосудом. Из свободной от жидкости части капилляра удаляется воздух и верхний конец его запаивается.

В быту для измерения температуры используется шкала Цельсия. В этой шкале за нуль градусов принимается температура таяния льда при давлении, равном атмосферному ($1{,}013 \cdot 10^5$ Па). Температура кипения воды при том же давлении считается равной ста градусам Цельсия (100º С). Температура, измеренная в градусах Цельсия, обозначается t.

В физике для измерения температуры используется ***шкала Кельвина***, единица измерения называется кельвин (К). По величине кельвин совпадает с градусом Цельсия, но нуль шкалы приходится на температуру –273,15ºС. Эта температура называется абсолютным нулем температур, а шкала Кельвина – абсолютной шкалой температур. Температура, измеренная в кельвинах, обозначается Т, ее величина

$$T = t + 273{,}15. \qquad (5.2)$$

В основе термодинамического метода лежит использование экспериментально установленных соотношений между параметрами состояния различных тел и сформулированных на их основе общих принципов. Изучаются процессы превращения энергии в различных термодинамических системах. При этом не используются какие-либо представления о внутреннем строении исследуемых тел и движении составляющих их частиц. Только дополняя друг друга, термодинамический и молекулярно-кинетический методы могут дать полное представление об изменениях состояний тел.

Состояние тела называется равновесным, если оно при неизменных внешних условиях может оставаться неизменным сколь угодно долго. Переход тела из одного состояния в другое называется процессом. Если переход осуществляется достаточно медленно и в каждый момент перехода состояние тела можно считать равновесным, то и процесс называется равновесным.

Рассмотрим в качестве примеров экспериментально полученных соотношений между параметрами состояния газообразного тела законы идеального газа. Они являются также уравнениями, связывающими параметры состояния газа при изотермическом, изобарическом и изохорическом равновесных процессах.

Идеальным называется газ, молекулы которого не взаимодействуют друг с другом на расстоянии и имеют исчезающие малые собственные объемы. У реальных газов молекулы отталкиваются на малых расстояниях и притягиваются на больших. Но притяжение быстро уменьшается при увеличении расстояния, при атмосферном давлении и температуре около 300 К среднее расстояние между молекулами достаточно велико, чтобы взаимодействие считать пренебрежимо малым для большинства реальных газов. Соответственно для них выполняются законы идеального газа.

Закон Бойля-Мариотта: при неизменных температуре и массе газа произведение его давления и объема не изменяется, т.е. при $T=const$, $m=const$, $PV=const$.

Закон Гей-Люссака: при неизменных давлении и массе газа отношение его объема к абсолютной температуре не изменяется, т.е. при $P=const$, $m=const$, $V/T=const$.

Закон Шарля: при неизменных объеме и массе газа отношение его давления к абсолютной температуре не изменяется, т.е. при $V=const$, $m=const$, $P/T=const$.

Приведенные законы идеального газа дополняет ***закон Авогадро***: при одинаковых внешних условиях моли всех идеальных газов занимают одинаковые объемы. Нормальным условиям (атмосферное давление и температура 273,15 К) соответствует объем моля 22,4 литра.

Все три закона идеального газа и закон Авогадро объединяет ***уравнение Менделеева-Клапейрона***:

$$\boldsymbol{PV = \frac{m}{M}RT}, \tag{5.3}$$

где $\boldsymbol{R}$ – универсальная газовая постоянная, $\boldsymbol{R}$=8,31 $\frac{Дж}{моль \cdot К}$. Нетрудно убедиться, что при соответствующих условиях это уравнение превращается в каждое из приведенных выше соотношений.

Преобразуя уравнение Менделеева-Клапейрона можно выразить давление газа через температуру и число молекул в единице объема n:

$$\boldsymbol{P = \frac{N}{V}kT = nkT}, \tag{5.4}$$

где $\boldsymbol{N = \frac{m}{M}N_A}$ – полное число молекул газа; $\boldsymbol{k = R / N_A}$ – постоянная Больцмана ($\boldsymbol{k}$ = 1,38·10^{-23} Дж / К).

Давление газа на стенки сосуда объясняется столкновениями со стенками молекул. Столкновения молекул идеального газа между собой и со стенками можно считать абсолютно упругими. В промежутках между столкновениями молекулы движутся равномерно и прямолинейно, при столкновениях меняются направление движения и величина скорости. В целом движение молекул идеального газа хаотично, среднее число молекул, движущихся в каждом выделенном направлении, одинаково. Оценка импульса, передаваемого молекулами участку поверхности $\boldsymbol{dS}$ за время $\boldsymbol{dt}$, позволяет выразить давление газа через число молекул в единице объема и среднюю кинетическую энергию теплового движения молекулы $\langle\varepsilon\rangle$:

$$\boldsymbol{P = \frac{2}{3}n\langle\varepsilon\rangle}. \tag{5.5}$$

Формула (5.5) называется ***основным законом молекулярно-кинетической теории газов***. Сравнение ее с формулой (5.4) показывает, что средняя кинетическая энергия теплового движения молекулы

$$\boldsymbol{\langle\varepsilon\rangle = \frac{3}{2}kT}. \tag{5.6}$$

Таким образом, температура есть мера энергии теплового движения молекул. Абсолютный нуль температуры соответствует полному прекращению теплового движения, что объясняет его название.

5.2 Описание установки и метода измерений

Установка для измерения универсальной газовой постоянной состоит из трех блоков – рабочего, приборного и насосного (Р, ВМ и ВН на рис. 5.1)

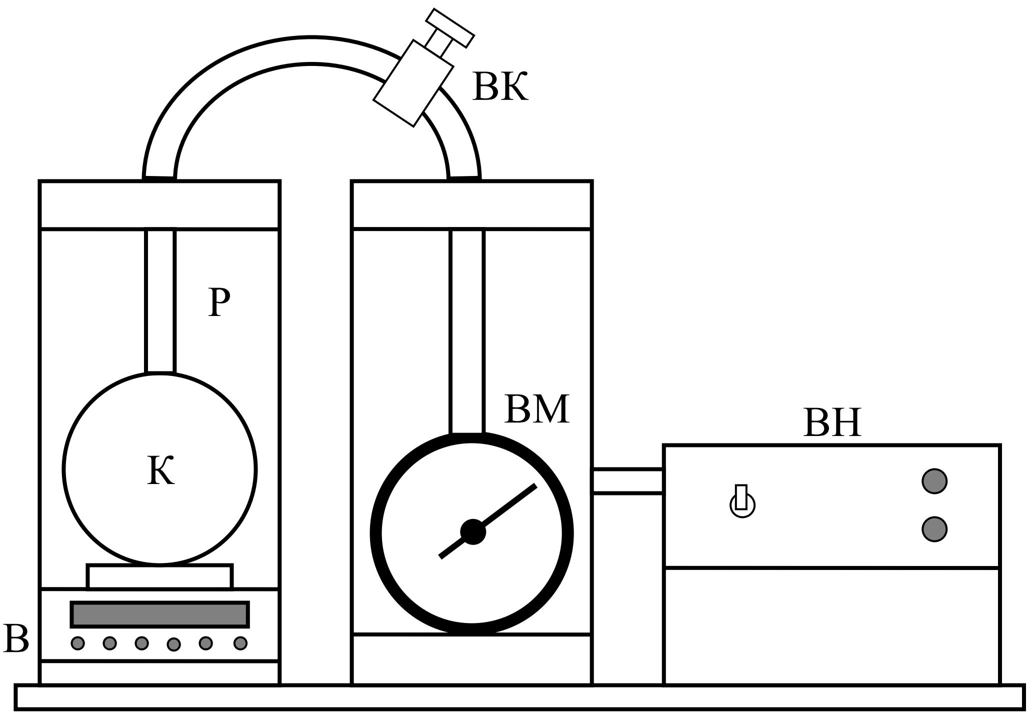


Рисунок 5.1

В нижней части рабочего блока находятся лабораторные весы В. На передней панели весов располагается цифровой индикатор, показывающий вес, и кнопки управления. Перед началом работы необходимо убедиться, что весы подключены к источнику питания, о чем свидетельствует горящая сигнальная лампочка зеленого цвета на передней панели. Затем следует нажать правую крайнюю кнопку и убедиться, что на индикаторе появились цифры. Следует сразу же проверить правильность настройки весов, о ней свидетельствует латинская буква «g» справа от цифр. Если же справа от цифр стоят другие буквы, следует сообщить об этом преподавателю.

На чашке весов закреплена стеклянная колба К. К колбе подсоединяется вакуумная трубка, свободно проходящая через отверстие в крышке рабочего блока. Эта трубка соединяет колбу с измерительным блоком, внутри которого находится вакуумметр. На трубке имеется вакуумный кран ВК, позволяющий заполнить систему воздухом после завершения измерений. Вакуумметр показывает уменьшение давления в закрепленной на весах колбе в долях атмосферного давления, равного $1{,}013 \cdot 10^5$ Па. Кроме того, в измерительном блоке находится термометр, показания которого выводятся на цифровой индикатор.

В насосном блоке находится вакуумный насос, откачивающий воздух из закрепленной на весах колбы. На передней панели блока находится тумблер, включающий напряжение, подаваемое на электрическую систему блока. Электромотор, вращающий вакуумный насос, приводится в действие находящейся на передней панели кнопкой и работает только до тех пор, пока кнопка остается нажатой.

Для определения универсальной газовой постоянной производится измерение массы колбы при двух значения давления: $\boldsymbol{P_1}$ и $\boldsymbol{P_2}$. Соответствующие значения массы $\boldsymbol{m_1}$ и $\boldsymbol{m_2}$ связаны со значениями давления уравнением Менделеева-Клапейрона (5.3):

$$\boldsymbol{P_1 V = \frac{m_1}{M} RT};$$

$$\boldsymbol{P_2 V = \frac{m_2}{M} RT}.$$

Вычитая из первого уравнения второе, можем получить рабочую формулу для вычисления универсальной газовой постоянной:

$$\boldsymbol{R = \frac{MV(P_1 - P_2)}{T(m_1 - m_2)}}. \qquad (5.7)$$

Температура воздуха определяется с помощью находящегося в измерительном блоке термометра, молярная масса воздуха считается равной М=29 г/моль, объем используемой при измерениях колбы V = 1,026 л = $1{,}026 \cdot 10^{-3}$ м^3.

5.3 Порядок выполнения работы

1 Включить электропитание насосного блока и весов, убедиться в правильной настройке весов. Открыв вакуумный кран ВК, за-

полнить колбу воздухом, после чего закрыть кран, сделав систему герметичной. Записать в таблицу 5.1 массу колбы, соответствующую атмосферному давлению. Отдельно записать абсолютную температуру воздуха Т.

Таблица 5.1

№	***ΔP*, *1,013·10⁵ Па***	***P, 1,013·10⁵ Па***	***m*, г**
1	0	1	
2	0,2	0,8	
3	0,4	0,6	
4	0,6	0,4	
5	0,8	0,2	

2 Нажать кнопку, включающую вакуумный насос, держать ее нажатой, пока стрелка вакуумметра не дойдет до показания 0,2 и затем отпустить. Записать в таблицу 5.1 массу колбы, соответствующую давлению, составляющему 0,8 от атмосферного.

3 Снова нажать кнопку, включающую вакуумный насос, держать ее нажатой, пока стрелка вакуумметра не дойдет до показания 0,4 и затем отпустить. Записать в таблицу 5.1 массу колбы, соответствующую давлению, составляющему 0,6 от атмосферного.

4 Продолжать откачку воздуха из колбы до получения показаний вакуумметра 0,6 и 0,8. Записать в таблицу 5.1 массы колбы, соответствующие давлениям, составляющим 0,4 и 0,2 от атмосферного.

5.4 Обработка результатов измерений

1 Вычислить величины $P_1 - P_2$, $m_1 - m_2$, используя данные опытов №1 и №5 из таблицы 5.1. Записать результаты вычислений в первую строку таблицы 5.2.

Таблица 5.2

Пары измерений	***$P_1 - P_2$, 10^5 Па***	***$m_1 - m_2$, г***	***R, Дж/(моль·К)***	***ΔR, Дж/(моль·К)***
1 – 5				
1 – 4				
2 – 5				
1 – 3				
2 – 4				
3 – 5				
Средние				

2 Повторить вычисление величин $\boldsymbol{P_1 - P_2}$, $\boldsymbol{m_1 - m_2}$ еще пять раз, используя данные опытов с номерами, указанными в первом столбце таблицы 5.2.

3 По формуле (5.7) вычислить и вписать в таблицу 5.2 шесть значений универсальной газовой постоянной $\boldsymbol{R}$. Вычислить и вписать в таблицу 5.2 среднее значение $<\boldsymbol{R}>$.

4 Рассчитать абсолютные погрешности $\boldsymbol{\Delta R}$ для каждого из измерений и их среднее значение $<\boldsymbol{\Delta R}>$. Данные занести в табл. 5.2.

5 Рассчитать относительную погрешность проведённых измерений, используя средние значения $<\boldsymbol{R}>$ и $<\boldsymbol{\Delta R}>$, записать результат в стандартной форме:

$$\boldsymbol{R} = <\boldsymbol{R}> + <\boldsymbol{\Delta R}>$$

5.5 Контрольные вопросы

1 На каких представлениях базируется молекулярно-кинетическая теория? Наблюдение каких явлений привело к появлению этих представлений?

2 Что такое количество вещества, один моль вещества, число Авогадро?

3 Как задается состояние тела в термодинамическом методе? Какие параметры состояния тела наиболее часто используются?

4 Что такое давление и что такое температура? В каких единицах измеряются эти величины? Какая шкала температур называется абсолютной?

5 Что такое процесс в термодинамике? Какие процессы называются равновесными?

6 Какие соотношения лежат в основе термодинамического метода? Привести в качестве примера законы идеального газа.

7 Что представляет из себя идеальный газ с точки зрения молекулярно-кинетической теории? Как обосновываются такие представления законами идеального газа?

8 Как объясняет молекулярно-кинетическая теория давление газа на стенки сосуда. Сформулировать основной закон молекулярно-кинетической теории газов.

9 Как связаны между собой энергия теплового движения молекул тела и его температура? В чем заключается физический смысл абсолютного нуля температур?

10 В чем смысл используемого метода определения универсальной газовой постоянной? Вывести расчётную формулу.

6 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №22

ОПЫТНАЯ ПРОВЕРКА ЗАКОНА ДЮЛОНГА И ПТИ

Цель работы: ознакомиться с основными законами термодинамики, теорией теплоемкости твердого тела, определить удельную и молярную теплоемкости различных металлов, опытным путем проверить закон Дюлонга и Пти.

6.1 Краткие теоретические сведения

Внутренняя энергия тела включает в себя кинетическую энергию теплового движения молекул, потенциальную энергию взаимодействия между всеми молекулами и внутримолекулярную энергию всех молекул. Последняя состоит из кинетической энергии движения частей молекулы друг относительно друга и потенциальной энергии их взаимодействия. Обозначается внутренняя энергия буквой $\boldsymbol{U}$. Она является функцией состояния тела, это означает, что она зависит только от состояния и не зависит от способа, каким тело приведено к этому состоянию.

В соответствии с законами механики изменение внутренней энергии $\boldsymbol{\Delta U}$ равно работе всех сил, действующих на тело. Работа же разделяется на работу сил, действующих на тело в целом и вызывающих изменение его объема, (обозначается $\boldsymbol{\Delta A'}$) и работу сил, действующих на молекулы тела со стороны молекул окружающих тел. Последняя не сопровождается какими-либо макроскопическими движениями и называется количеством тепла, переданного телу (обозначается $\boldsymbol{\Delta Q}$). Если перейти к работе, выполняемой данным телом над внешними телами, $\boldsymbol{\Delta A = -\Delta A'}$, то

$$\boldsymbol{\Delta Q = \Delta U + \Delta A}, \tag{6.1}$$

т.е. полученное телом тепло расходуется на изменение его внутренней энергии и выполнение им работы. Формула (6.1) называется первым законом термодинамики, который, по сути, является законом сохранения энергии.

Опыт показывает, что передача телу или получение от него тепла сопровождается изменением его температуры, пропорциональным переданному или полученному количеству тепла:

$$\Delta \boldsymbol{Q} = \boldsymbol{C} \Delta \boldsymbol{T}, \tag{6.2}$$

где $\Delta T = T_2 - T_1$ – разность конечной и начальной температур; C – ***теплоемкость тела***, равная количеству теплоты , необходимому для нагревания его на 1 К.

Для однородного тела теплоемкость прямо пропорциональна его массе m:

$$C = c\,m, \tag{6.3}$$

где c – ***удельная теплоемкость вещества***, из которого состоит тело. Она равна количеству теплоты, необходимому для нагревания единицы массы вещества на 1 К.

Теплоемкость одного моля вещества называется ***молярной теплоемкостью*** (обозначается C_M):

$$C_M = c\,M = \frac{\Delta Q\,M}{\Delta T\,m}, \tag{6.4}$$

где M – масса одного моля вещества. Эта масса в граммах численно равна массе молекулы в атомных единицах массы, т.е. она пропорциональна массе молекулы. А значит, отношение массы моля к массе молекулы, равное числу молекул в одном моле, одинаково для всех веществ. Оно называется число Авогадро и равно: N_A=6,07·10^{23} моль$^{-1}$.

При вычислении внутренней энергии кристаллического твердого тела можно использовать принцип равнораспределения энергии по степеням свободы движения составляющих его атомов. Число степеней свободы атомов – это число независимых координат, которыми можно задать положение атома в пространстве. На каждую классическую степень свободы атома приходится средняя кинетическая энергия теплового движения, равная:

$$\langle \varepsilon_K \rangle = \frac{kT}{2}, \tag{6.5}$$

где $k = R / N_A$ – постоянная Больцмана, k = 1,38·10^{-23} Дж / К.

Тепловое движение атомов в кристаллическом твердом теле представляет из себя гармонические колебания относительно положений равновесия, которые являются узлами кристаллической решетки. Колебания могут осуществляться в трех перпендикулярных направлениях независимо друг от друга, соответственно для задания положения атома в пространстве требуется три независимые координаты.

Каждый атом кристалла имеет три колебательных степени свободы, и формула (6.5) определяет среднюю кинетическую энергию теплового движения, приходящуюся на каждую из них. Но атомы кристалла имеют также потенциальную энергию взаимодействия друг с другом, при характерных для кристалла расстояниях между атомами пренебрегать ею нельзя. В случае гармонических колебаний происходит переход кинетической энергии в потенциальную и обратно, причем суммарная полная механическая энергия не изменяется. Отсюда следует, что характер изменений со временем у кинетической и потенциальной энергий должен совпадать, а значит, должны совпадать и их средние значения. Тогда средняя тепловая энергия, приходящаяся на одну колебательную степень свободы атома,

$$\langle \varepsilon \rangle = \boldsymbol{k\,T}. \qquad (6.6)$$

Для получения внутренней энергии кристаллического твердого тела достаточно среднюю энергию $\langle \varepsilon \rangle$ умножить на число атомов тела $\boldsymbol{N = N_A \frac{m}{M}}$ и число колебательных степеней свободы атома:

$$\boldsymbol{U = 3\,N\,k\,T = 3\,\frac{m}{M}\,N_A\,k\,T = 3\,\frac{m}{M}\,R\,T.} \qquad (6.7)$$

Очевидно, что внутренняя энергия одного моля вещества $\boldsymbol{U_M}$ одинакова для всех кристаллических тел и равна:

$$\boldsymbol{U_M = 3\,R\,T}. \qquad (6.8)$$

Изменение внутренней энергии кристаллического твердого тела может быть связано только с изменением его температуры $\boldsymbol{\Delta T}$. Учтем также, что работа, выполняемая телом, $\boldsymbol{\Delta A = \int_{V_1}^{V_2} P\,dV}$ и запишем первый закон термодинамики:

$$\boldsymbol{\Delta Q = 3\,R\,\Delta T + \int_{V_1}^{V_2} P\,dV}. \qquad (6.9)$$

Изменения объема кристаллического твердого тела при изменении температуры настолько малы, что ими можно пренебречь и считать объем постоянным, а процесс изохорным. Это означает, что второе слагаемое в формуле (6.9) считается равным нулю и полученное телом количество тепла $\boldsymbol{\Delta Q = 3\,R\,\Delta T}$.

Подставляем это выражение в формулу для молярной теплоемкости тела (6.4) и получаем ***закон Дюлонга и Пти*** – молярные теплоемкости всех кристаллических тел одинаковы и равны:

$$\boldsymbol{C_M = 3\,R.} \qquad (6.10)$$

6.2 Описание установки и метода

Установка для измерения удельной и молярной теплоемкостей металлических образцов состоит из двух блоков – рабочего и приборного (РБ и ПБ на рис. 6.1).

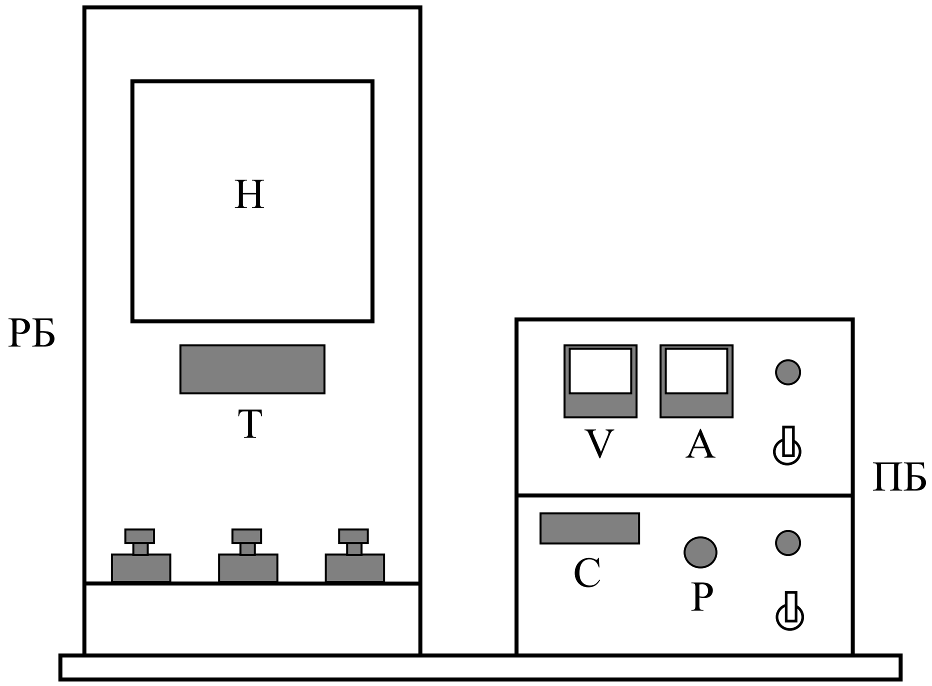


Рисунок 6.1

В верхней части рабочего блока находится нагреватель Н. Сверху нагреватель имеет крышку, которая закрывает гнездо для установки образца. Образцы в форме усеченного конуса находятся в гнездах в нижней части рабочего блока. Имеется три образца – железный, алюминиевый и латунный. С помощью специального приспособления они должны по очереди выниматься из своих гнезд и вставляться в гнездо нагревателя. Если при вынимании образца из гнезда нагревателя возникнут трудности, образец можно выдавить из гнезда с помощью специального винта, расположенного снизу. После этого следует вернуть винт в исходное положение.

В таблице 6.1 приведены параметры образцов.

Таблица 6.1

№	Материал	Масса одного моля вещества, кг	Масса образца, кг
1	Железо	0,056	0,133
2	Алюминий	0,027	0,046
3	Латунь	0,064	0,152

Ниже нагревателя на стенке рабочего блока находится цифровой контроллер Т, показывающий температуру нагревателя. Измерение температуры производится с помощью электронного датчика.

При проведении измерений, когда производится переход от одного образца к следующему, возникает необходимость в быстром охлаждении нагревателя. Для этого в его гнездо следует вставлять холодный образец, после его нагревания заменять образец на другой, охлажденный за пределами нагревателя. Эти действия следует продолжать до достижения температуры, позволяющей продолжить измерения.

Лицевая панель приборного блока разделена на две части. В верхней находятся вольтметр V и амперметр A. Они измеряют напряжение на нагревательном элементе и силу протекающего через него тока. В этой же части находятся тумблер и индикаторная лампочка включения сетевого напряжения. В нижней части лицевой панели находятся тумблер и индикаторная лампочка включения нагревателя, регулятор тока через нагревательный элемент Р и секундомер С. Нижняя кнопка секундомера предназначена для приведения секундомера в рабочий режим, верхняя кнопка запускает и останавливает счет времени, средняя кнопка сбрасывает показания секундомера.

6.3 Порядок выполнения работы

1 Открыть доступ к образцам и нагревателю, сняв защитный кожух с рабочего блока. Включить установку в сеть и привести секундомер в рабочее состояние (при этом цифровой индикатор секундомера должен показывать 0,00).

2 Не открывая нагреватель и не устанавливая образец, включить электрический ток. Установить значение напряжения на нагревателе, указанное преподавателем. Записать значение напряжения U и силы тока I в таблицу 6.2, вычислить и записать туда же значение мощности нагревателя $\boldsymbol{P=UI}$.

Таблица 6.2

U, В	*I, А*	*P, Вт*

3 В момент начала нагрева, когда во второй раз появится следующая цифра на индикаторе температуры, включить секундомер. Выключить его при вторичном появлении цифры, соответствующей температуре, на 5 К большей. Значение времени нагрева записать во второй столбец таблицы 6.3, в строку, обозначенную буквой Н.

Таблица 6.3

№	$t_{нагр}$, с	$t_{охлаж}$, с	$\Delta Q_{полн}$, Дж	η	$\Delta Q_{обр}$, Дж
Н					
1					
2					
3					

4 Выключить нагреватель. Произвести сброс секундомера и включить его при начале остывания нагревателя. Измерить время остывания нагревателя на 1 К и записать его в третий столбец той же строки таблицы 6.3.

5 Повторить измерения, вставляя по очереди в нагреватель три образца. Результаты измерений записать в таблицу 6.3.

6.4 Обработка результатов измерений

1 По формуле $\Delta Q_{полн} = P\,t$ вычислить и записать в таблицу 6.3 значения количества теплоты, выделившейся в нагревателе.

2 По формуле $\eta = 1 - t_{нагр}/(5\,t_{охлаж})$ вычислить и записать в таблицу 6.3 значения коэффициента полезного действия для процессов нагревания образцов.

3 По формуле $\Delta Q_{обр} = (\eta\ \Delta Q_{полн} - \Delta Q_{нагр})$ вычислить и записать в таблицу 6.3 значения количеств тепла, полученных образцами при нагревании на 5 К.
4 По формуле $C = \Delta Q_{обр} / 5$ вычислить и вписать в таблицу 6.4 значения теплоемкостей образцов.

Таблица 6.4

№	*C Дж/К*	*c Дж/(К·кг)*	C_M *Дж/(К·моль)*	C_M / R
1				
2				
3				

5 По формуле $c = C / m$ вычислить и вписать в таблицу 6.4 значения удельных теплоемкостей материалов образцов.
6 По формуле $C_M = c\ M$ вычислить и вписать в таблицу 6.4 значения молярных теплоемкостей материалов образцов.
7 Вычислить и вписать в таблицу 6.4 значения отношений молярных теплоемкостей к универсальной газовой постоянной C_M / R. Сделать вывод о выполнении закона Дюлонга и Пти.

6.5 Контрольные вопросы

1. Что такое внутренняя энергия и что такое количество теплоты?
2 Что такое теплоёмкость тела, молярная и удельная теплоёмкость вещества?
3 Сформулировать и записать первый закон термодинамики.
4 Как читается теорема о равном распределении энергии по степеням свободы тела?
5 Какой характер имеет тепловое движение атомов в кристалле?
6 Какая средняя тепловая энергия приходится на одну степень свободы атома в кристалле?
7 Определить внутреннюю энергию кристаллического тела произвольной массы и одного моля вещества этого тела.
8 Сформулировать закон Дюлонга и Пти.
9 Что представляет собой исследовательская установка?

7 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №23

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ УДЕЛЬНЫХ ТЕПЛОЁМКОСТЕЙ ВОЗДУХА ПО МЕТОДУ КЛЕМАНА–ДЕЗОРМА

Цель работы: ознакомиться с теорией теплоемкости идеального газа, с методом Клемана-Дезорма, определить отношение удельной теплоемкости при постоянном давлении к удельной теплоемкости при постоянном объеме для воздуха.

7.1 Краткие теоретические сведения

Идеальным называется газ, молекулы которого не взаимодействуют друг с другом на расстоянии и имеют исчезающие малые собственные объемы. У реальных газов молекулы отталкиваются на малых расстояниях и притягиваются на больших. Но притяжение быстро уменьшается при увеличении расстояния, при атмосферном давлении и температуре около 300 К среднее расстояние между молекулами достаточно велико, чтобы взаимодействие считать пренебрежимо малым для большинства реальных газов. Соответственно для них выполняются законы идеального газа.

Состояние идеального газа характеризуется следующими параметрами состояния: массой газа m, объемом $\boldsymbol{V}$, давлением $\boldsymbol{P}$, температурой $\boldsymbol{T}$. Параметры состояния идеального газа взаимосвязаны ***уравнением Менделеева-Клапейрона***:

$$\boldsymbol{PV} = \frac{\boldsymbol{m}}{\boldsymbol{M}}\boldsymbol{RT}, \qquad (7.1)$$

где $\boldsymbol{R}$ – универсальная газовая постоянная, $\boldsymbol{R}$=8,31 $\frac{Дж}{моль \cdot К}$; $\boldsymbol{M}$ – масса одного моля газа. Эта масса в граммах численно равна массе молекулы в атомных единицах массы, т.е. она пропорциональна массе молекулы. А значит, отношение массы моля к массе молекулы, равное числу молекул в одном моле, одинаково для всех веществ. Оно называется числом Авогадро и равно: $\boldsymbol{N_A}=6{,}07\cdot10^{23}$ моль$^{-1}$.

Изменить состояние газа возможно путем передачи количества теплоты или совершением работы над газом. Количество теплоты, полученное газом, пропорционально изменению его температуры:

$$\Delta\boldsymbol{Q} = \boldsymbol{C}\Delta\boldsymbol{T}, \qquad (7.2)$$

где $\Delta T = T_2 - T_1$ – разность конечной и начальной температур; C – ***теплоемкость газа***, равная количеству теплоты, необходимому для нагревания его на 1 К.

Для однородного вещества теплоемкость прямо пропорциональна его массе m:

$$C = c\, m, \qquad (7.3)$$

где c – ***удельная теплоемкость вещества***, равная количеству теплоты, необходимому для нагревания единицы массы вещества на 1 К.

Теплоемкость одного моля вещества называется ***молярной теплоемкостью*** (обозначается C_M):

$$C_M = c\, M = \frac{\Delta Q\, M}{\Delta T\, m}. \qquad (7.4)$$

Количество теплоты, сообщенное газу, расходуется на изменение внутренней энергии газа и на совершение работы газом против внешних сил:

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta A, \qquad (7.5)$$

где $\Delta U = U_2 - U_1$ – изменение внутренней энергии идеального газа; $\Delta A = \int_{V_1}^{V_2} P dV$ - работа, выполненная газом. Уравнение (7.5) называется ***первым законом термодинамики***.

При вычислении внутренней энергии идеального газа используется принцип равнораспределения энергии по степеням свободы молекулы. На каждую классическую степень свободы молекулы приходится средняя кинетическая энергия теплового движения, равная:

$$\langle \varepsilon_i \rangle = \frac{kT}{2}, \qquad (7.6)$$

где $k = R / N_A$ – постоянная Больцмана, $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж / К.

Внутренняя энергия тела включает в себя кинетическую энергию теплового движения молекул, потенциальную энергию взаимодействия между всеми молекулами и внутримолекулярную энергию всех молекул. Последняя состоит из кинетической энергии движения частей молекулы друг относительно друга и потенциальной энергии их взаимодействия.

Внутренняя энергия идеального газа состоит только из кинетической энергии теплового движения молекул. Потенциальная энергия межмолекулярного взаимодействия пренебрежимо мала, части молекул при температурах порядка сотен кельвинов друг относительно друга не смещаются. Для получения внутренней энергии идеального газа достаточно среднюю энергию $\langle \varepsilon_i \rangle$ умножить на число молекул газа $N = N_A \dfrac{m}{M}$ и число степеней свободы молекул газа, т.е. число независимых координат, которыми можно задать положение молекулы в пространстве. Обозначим это число i. Тогда изменение внутренней энергии газа равно:

$$\Delta U = \frac{i}{2} N k \Delta T = \frac{i}{2}\frac{m}{M} N_A k \Delta T = \frac{i}{2}\frac{m}{M} R \Delta T. \qquad (7.7)$$

Двухатомные молекулы, из которых в основном состоит воздух (N_2, O_2, H_2, CO), имеют 5 степеней свободы. Двухатомную модель можно представить в виде жесткого диполя. Центр масс этой системы имеет 3 степени свободы поступательного движения и 2 степени свободы вращательного движения. Момент инерции молекулы относительно оси OX равен нулю (I_x=0), поэтому шестой степенью свободы пренебрегаем (рис. 7.1).

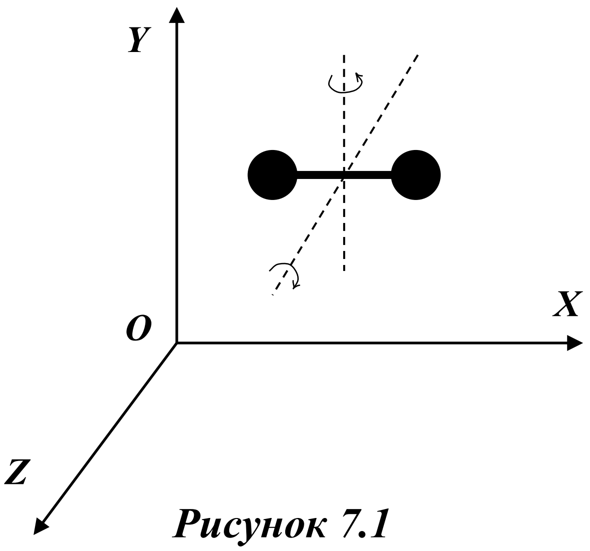


Рисунок 7.1

Если газ состоит из одноатомных молекул (инертные газы), то этим молекулам доступны только поступательные движения, они имеют три степени свободы (i=3).

Уравнение (7.5) можно представить в виде

$$\Delta Q = \frac{i}{2}\frac{m}{M} R \Delta T + \int_{V_1}^{V_2} P dV. \qquad (7.8)$$

В изохорном процессе объем газа остается неизменным ($V=const$, ΔV=0), работа газом не совершается: $A = \int_{V_1}^{V_2} P dV = 0$. Следовательно, в изохорном процессе все тепло, переданное газу, идет на изменение его внутренней энергии:

$$\Delta Q = \Delta U = \frac{i}{2}\frac{m}{M}R\,\Delta T. \qquad (7.9)$$

Молярная теплоемкость в этом процессе называется изохорной, из формулы (7.4) следует, что она равна:

$$C_M^V = \frac{iR}{2}. \qquad (7.10)$$

Если процесс протекает при постоянном давлении (***P=const***), то он называется изобарным. В этом процессе происходит изменение внутренней энергии газа и выполняется работа газом против внешних сил:

$$\Delta Q = \frac{i}{2}\frac{m}{M}R\,\Delta T + P(V_2 - V_1). \qquad (7.11)$$

Используя закон Менделеева-Клапейрона (7.1), вычисляем работу газа в изобарном процессе:

$$P\Delta V = \frac{m}{M}R\,\Delta T. \qquad (7.12)$$

Первый закон термодинамики для изобарного процесса с учетом уравнений (7.7) и (7.12) записываем в виде

$$\Delta Q = \frac{i}{2}\frac{m}{M}R\,\Delta T + \frac{m}{M}R\,\Delta T = \left(\frac{i}{2}+1\right)\frac{m}{M}R\,\Delta T. \qquad (7.13)$$

Молярная теплоемкость в этом процессе также определяется формулой (7.4), она равна:

$$C_M^P = \left(\frac{i}{2}+1\right)R. \qquad (7.14)$$

Сравнивая выражения (6.10) и (6.14), замечаем, что молярные теплоемкости зависят от числа степеней свободы молекулы. Отношение молярных теплоемкостей для воздуха определится:

$$\gamma = \frac{C_m^p}{C_m^v} = \frac{(i+2)R2}{2iR} = \frac{i+2}{i}, \qquad \gamma = \frac{5+2}{5} = 1{,}4. \qquad (7.15)$$

В практической части лабораторной работы предлагается определить отношение теплоемкостей γ экспериментально и сравнить его с теоретическим значением.

7.2 Описание установки и метода измерений

Для выполнения лабораторной работы необходимо познакомиться еще с двумя изопроцессами - изотермическим и адиабатическим.

Изотермическим называется процесс, который совершается при постоянных температуре и массе газа, описывается процесс ***законом Бойля-Мариотта***:

$$P_1V_1=P_2V_2. \qquad (7.16)$$

Адиабатическим называется процесс, который совершается над газом без теплообмена с окружающей средой. Процесс описывается ***уравнением Пуассона***:

$$P_1V_1^{\gamma}=P_0V_2^{\gamma}. \qquad (7.17)$$

Графики изопроцессов газов представлены на рис.7.2: ***AC*** – изотерма в координатах ***P-V***, ***AB*** – адиабата в координатах ***P-V***.

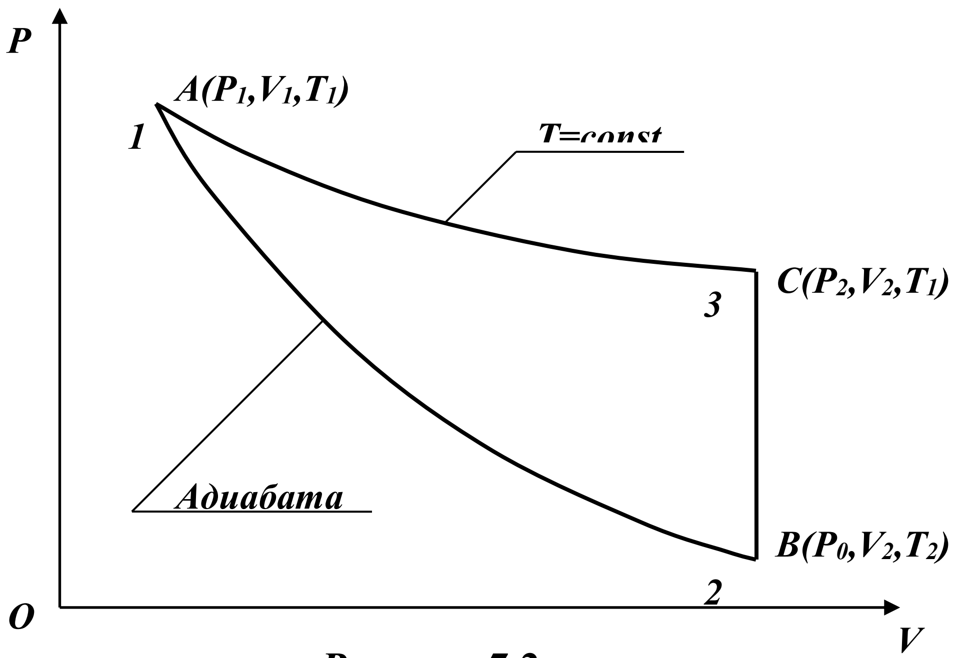


Рисунок 7.2

В адиабатическом процессе давление падает быстрее, чем в изотермическом, при одинаковом изменении объема в обоих процессах. Для определения отношения теплоемкостей газа γ реализуется адиабатический процесс при помощи прибора Клемана-Дезорма.

Сущность метода Клемана-Дезорма состоит в том, что некоторую массу газа, близкого по свойствам к идеальному газу, путем адиабатического расширения (адиабата ***AB*** на рис.7.2) и изохорического нагревания (изохора ***BC***, ***V=const***) переводят из одного состояния ($P_1V_1T_1$, точка ***A*** на рис. 6.2) в другое состояние ($P_2V_2T_1$, т. ***C***). Но состояние газа с параметрами $P_2V_2T_1$ характеризует и перевод газа по изотерме из состояния $P_1V_1T_1$ (т. ***A***).

Таким образом, в состояние ***C*** можно перевести газ двумя изопроцессами:

1) изотерма $P_1V_1=P_2V_2$;

2) адиабата $P_1V_1^{\gamma}=P_0V_2^{\gamma}$ с изохорой.

Уравнение изотермы возводим в степень γ:

$$P_1^{\gamma}V_1^{\gamma}=P_2^{\gamma}V_2^{\gamma}. \quad (7.18)$$

Разделив уравнение (7.18) на уравнение (7.17), получим:

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\gamma}=\frac{P_1}{P_0}. \quad (7.19).$$

Таким образом, измеряя давления газа, можно определить искомую величину γ.

Для практической реализации метода адиабатического расширения используется баллон большой емкос-ти. Горловина баллона закрыта пробкой с тремя отверстиями, в которых размещены три трубки с кранами (рис.7.3). Кран ***K*** соединяет баллон с атмосферой, кран K_1 – с насосом ***H***. Третья трубка связывает баллон с водяным манометром ***M***.

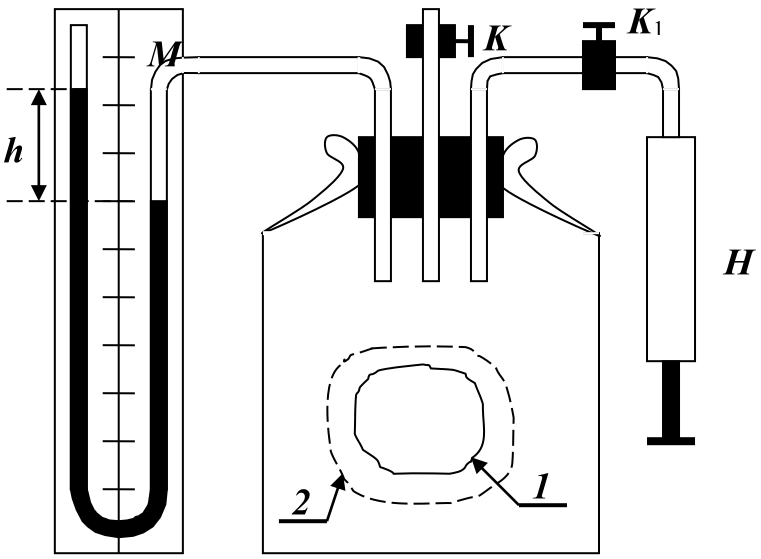


Рисунок 7.3

С помощью насоса в баллон накачивают воздух. Кран ***K*** должен быть закрытым. Накачивание воздуха происходит довольно быстро, поэтому воздух в насосе и, конечно, в баллоне разогревается.

Спустя некоторое время избыточная теплота перейдет к воздуху комнаты и установится тепловое равновесие, которое характеризуется комнатной температурой T_1 и давлением $P_1 = P_0 + h_1$, где P_0 - давление воздуха в комнате, а h_1-показатель разности уровней водяных столбов в манометре. Выделив мысленно некоторый исследуемый объём газа V_1 (состояние ***1*** изображено линией ***1*** на рис. 7.3), получим его состояние, которое изображено точкой $A(P_1, V_1, T_1)$ на диаграмме (см. рис. 7.2).

Открывая кран ***К***, соединяем баллон с комнатой. Процесс расширения газа происходит быстро, что приблизительно отвечает адиабатическому процессу. Выделенный объём газа перейдёт в состояние ***2*** (на диаграмме рис.7.2 точка ***B***). Его объём V_2 (состояние ***2*** изображено пунктирной линией ***2*** в баллоне на рис. 7.3) больше, чем V_1, давление P_0 равняется комнатному, температура T_2 ниже комнатной, так как газ выполнил работу адиабатического расширения.

После окончания процесса адиабатического расширения кран ***К*** перекрывается и газ в баллоне нагревается, получая тепло из комнаты. Спустя некоторое время температура газа в баллоне станет равной комнатной, выделенный объём перейдёт в состояние 3 (на рис.7.2 точка $C(P_2, V_2, T_1)$).

Этот объём станет равным объёму в состоянии ***2***, а давление $P_2 = P_0 + h_2$, где h_2 - разность уровней в коленах манометра после достижения равновесного состояния газа в баллоне.

Используя уравнение (7.19), получаем:

$$\left(\frac{P_0 + h_1}{P_0 + h_2}\right)^{\gamma} = \frac{P_0 + h_1}{P_0}. \qquad (7.20)$$

После преобразования уравнения (7.20), получим:

$$P_0^{\gamma-1}\left(1 + \frac{h_1}{P_0}\right)^{\gamma-1} = P_0^{\gamma-1}\left(1 + \frac{h_2}{P_0}\right)^{\gamma}.$$

После сокращения на $P_0^{\gamma-1}$ и логарифмирования получим:

$$(\gamma - 1)\ln\left(1 + \frac{h_1}{P_0}\right) = \gamma \ln\left(1 + \frac{h_2}{P_0}\right). \qquad (7.21)$$

Отношение $\frac{h}{P_0}$ - малая величина, так как h_1 и h_2 - около десятка сантиметров водяного столба, а P_0 имеет около ***760 мм*** ртутного столбика, или ***760·13,6=10366 мм*** водяного столба. Поэтому при разложении в ряд логарифмов можно ограничиться величинами первой степени малости:

$$ln\left(1+\frac{h_1}{P_0}\right)=\frac{h}{P_0}-\frac{1}{2}\left(\frac{h}{P_0}\right)^2+\frac{1}{3}\left(\frac{h}{P_0}\right)^3-...\cong\frac{h}{P_0},$$

что даст возможность переписать уравнение (7.21):

$$(\gamma-1)\frac{h_1}{P_0}=\gamma\frac{h_2}{P_0},$$

откуда

$$\gamma=\frac{h_1}{h_1-h_2}. \tag{7.22}$$

Значения h_1 и h_2 поддаются прямым измерениям, и формула (7.22) является расчетной для определения отношения теплоёмкостей воздуха при постоянном давлении и постоянном объёме.

6.3 Порядок выполнения работы

1 Закрыть кран ***К*** (см. рис. 7.3) и, открыв кран K_1, осторожно нагнетать насосом воздух в баллон до тех пор, пока разность уровней воды в манометре не станет 10 … 15 см.

2 Закрыть кран K_1 и через 2 … 3 мин, если водяной столб прекратит движение, зафиксировать значение h_1 и занести его в таблицу 7.1.

3 Открыть кран ***К***, соединяющий баллон с воздухом комнаты, и дать возможность воздуху быстро выйти из баллона. Когда уровни водяного столба установятся на нулевой отметке (или столбики уравняются на произвольной отметке), перекрыть кран ***К***. Соответствующие действия необходимо выполнять как можно быстрее.

4 Дать 2 … 3 минуты выдержки и наблюдать за движением водяного столбика. После окончания этого времени, если движение водяного столба прекратится, зафиксировать значение h_2, и занести его в таблицу 7.1.

Таблица 7.1

7.4 Обработка результатов исследования

1 Рассчитать значения γ по формуле (7.22) для каждого из опытов и определить среднее значение величины $<\gamma>$ как среднее арифметическое полученных результатов.

№ п/п	h_1, *мм*	h_2, мм	$h_1 - h_2$, *мм*	γ	$\Delta\gamma$
1					
2					
3					
4					
5					
			Среднее		

2 Рассчитать абсолютные погрешности $\Delta\gamma_i$ для каждого из измерений и их среднее значение $<\Delta\gamma>$. Данные занести в табл. 7.1 .

3 Рассчитать относительную погрешность проведённых измерений, используя средние значения $<\gamma>$ и $<\Delta\gamma>$, записать результат в стандартной форме:

$$\gamma = <\gamma> + <\Delta\gamma>.$$

7.5 Контрольные вопросы

1 Какой газ называется идеальным?

2 Перечислить параметры состояния идеального газа и записать связывающее их соотношение.

3 Каким образом может изменяться состояние газа?

4 Каким образом передача газу теплоты изменяет его состояние?

5 Что такое теплоемкость тела, молярная и удельная теплоемкости вещества? Как они связаны между собой?

6 Что такое внутренняя энергия тела, из каких составляющих она складывается? В чем заключается особенность определения внутренней энергии идеального газа?

7 Сформулировать и записать первый закон термодинамики.
8 Какой общей формулой определяется работа, выполняемая газом при расширении?
9 Как читается теорема о равном распределении энергии по степеням свободы молекулы?
10 Определить внутреннюю энергию одного моля и произвольной массы идеального газа.
11 Чему равняется работа расширения газа и какой вид имеет уравнение первого закона термодинамики для изохорического и изобарного процессов?
12 Какой процесс называется изотермическим? Записать уравнение изотермы.
13 Какой процесс называется адиабатическим? Записать уравнение Пуассона.
14 Чему равняется отношение теплоёмкостей при постоянном давлении и постоянном объёме для идеальных газов и конкретно для воздуха? Можно ли считать воздух идеальным газом?
15 В чём состоит идея метода адиабатического расширения, предложенная Клеманом и Дезормом для определения отношения теплоемкостей газа при постоянном давлении и постоянном объеме?
16 Опишите прибор Клемана-Дезорма, предназначенный для определения отношения теплоемкостей газа при постоянном давлении и постоянном объеме?
17 Вывести расчётную формулу . для определения отношения теплоемкостей газа при постоянном давлении и постоянном объеме?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1 Бушок Г.Ф. Курс физики. - Кн. 1 / Г.Ф. Бушок, В.В. Левандовский, Г.Ф. Пивень. - К.:Лыбидь, 2001. - 346 с.

2 Бушок Г.Ф. Курс физики. Кн. 2 / Г.Ф. Бушок, Э.Ф. Венгер. - К.: Лыбидь, 2001. – 428 с.

3 Детлаф А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. - М.: Высш. шк., 1989. - 607 с.

4 Савельев И.В. Курс общей физики. Т.1. - М.: Наука, 1986. - 432 с.

5 Яворский Б.М. Справочник по физике. - М.: Наука, 1985. - 512 с.

6 Евграфова Н.Н. Руководство к лабораторным работам по физике / Н.Н. Евграфова, В.Л. Коган. - М.: Высш. шк., 1970. - 348 с.

7 Гольдин Л.Л. Руководство к лабораторным работам по физике. - М.: Высш. шк., 1973. - 688 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Навчальне видання

БІЛИХ Валерій Георгійович,
ДЕМЕДЮК Роман Олександрович,
КОСТЕНКО Володимир Михайлович,
ТУЛУПЕНКО Віктор Миколайович,
ФОМІНА Оксана Сергіївна

**Механіка. Молекулярна фізика
та термодинаміка**

Методичний посібник
до лабораторних робіт з дисципліни «Фізика»
(для студентів усіх спеціальностей вузу)

Видання друге, перероблене та доповнене
(Російською мовою)

Редактор
Комп'ютерна верстка

Підп. до друку Формат 60×84/16.
Папір офсетний. Ум. друк. арк. 7,5. Обл. – вид. арк. 5,4.
Тираж 50 прим. Зам №

Видавець і виготівник
„Донбаська державна машинобудівна академія"
84313, м. Краматорськ, вул. Шкадінова, 72.
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру
Серія ДК №1633 від 24.12.03.

В.Г.Белых,
Р.А.Демедюк,
В.М.Костенко,
В.Н.Тулупенко,
О.С.Фомина

МЕХАНИКА. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

к лабораторным работам по дисциплине «Физика»
(для студентов всех специальностей вуза)

КРАМАТОРСК 2015

Министерство образования и науки Украины
Донбасская государственная машиностроительная академия

В.Г.Белых,
Р.А.Демедюк,
В.М.Костенко,
В.Н.Тулупенко,
О.С.Фомина

МЕХАНИКА. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

к лабораторным работам по дисциплине «Физика»
(для студентов всех специальностей вуза)

Издание второе, переработанное и дополненное

В печать 50 экз.
Первый проректор
А.Н.Фесенко

Утверждено на заседании
ученого совета ДГМА
Протокол №   от

Краматорск 2015