

СОДЕРЖАНИЕ

МЕХАНИКА	2
Изучение законов равноускоренного движения на машине Атвуда.....	3
Изучение динамики вращательного движения.....	8
Изучение законов сохранения.....	17
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА	24
Определение молярной массы и плотности газа методом откачки.....	25
Определение отношения теплоемкостей методом Клемана и Дезорма.....	30
Определение коэффициента внутреннего трения жидкости по методу Стокса.....	37
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	44

МЕХАНИКА

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ РАВНОУСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ НА МАШИНЕ АТВУДА

Цель работы: изучение законов кинематики и динамики прямолинейного движения связанной системы тел.

Оборудование, средства измерения: машина Атвуда, набор грузов, электронный секундомер.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ И ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Основные законы кинематики и динамики прямолинейного движения тел в поле сил тяжести могут быть проверены на машине Атвуда (рис 1). Машина Атвуда состоит из вертикальной металлической стойки, на которой укреплена шкала, разделенная на сантиметры. На верхнем конце стойки укреплен легкий свободно вращающийся относительно горизонтальной оси блок. Перегрузок

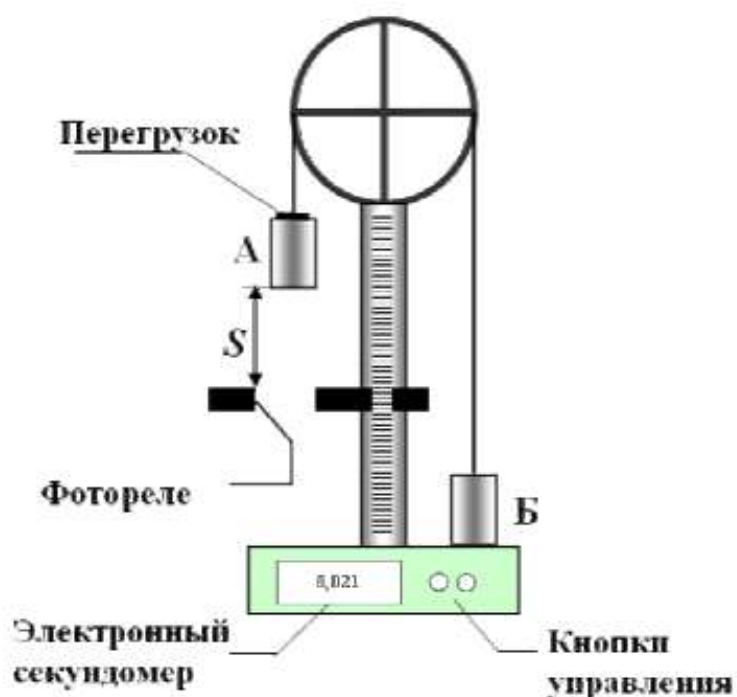


Рис. 1. Машина Атвуда

Через блок перекинута тонкая нить, имеющая на своих концах грузы А и Б равной массы M . На груз А помещают один или несколько перегрузов. В начале опыта груз Б удерживается неподвижно электромагнитом. При включении кнопки «Пуск» электромагнит отключается, и если на груз А положен перегрузок, система приходит в движение. Одновременно автоматически включается секундомер. Когда груз А пересекает луч фотореле, отсчет времени прекращается. Перемещением фотореле по стойке, можно задавать различные пути S для груза А.

Найдем закон движения груза А, пренебрегая массой блока и силами трения. На грузы действуют: силы тяжести, силы натяжения нити (рис. 2).

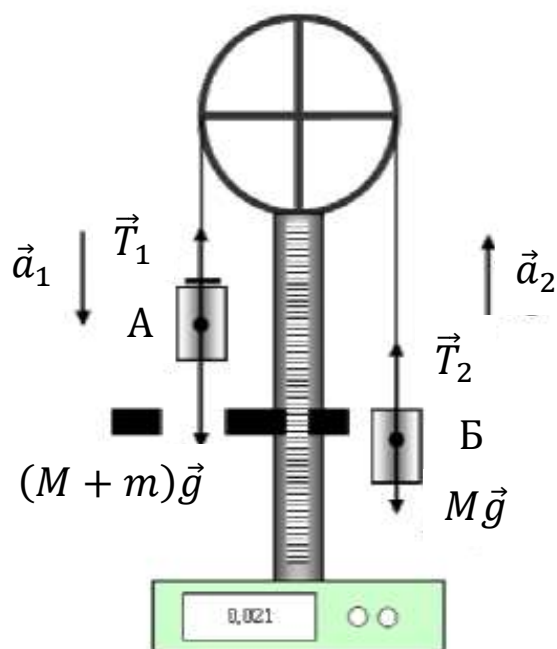


Рис. 2. К выводу уравнения движения

Так как растяжение нити ничтожно мало, то ускорение правого и левого грузов будут равны по величине и противоположны по направлению. При невесомом блоке $T_1 = T_2 = T$.

$$\begin{cases} (M + m)a = (M + m)g - T \\ Ma = T - Mg \end{cases}, \quad (1)$$

откуда ускорение системы

$$a = \frac{m}{2M + m}, \quad (2)$$

где M – масса груза; m – масса перегрузка; g – ускорение свободного падения.

Из (2) следует равноускоренный характер движения грузов.

Если грузы движутся равноускорено без начальной скорости, то $S = \frac{at^2}{2}$, откуда следует, что $\frac{S_1}{S_2} = \frac{t_1^2}{t_2^2}$.

ВЫПОЛНЕНИЕ ОПЫТА

Подтвердите экспериментально равноускоренный характер движения грузов, изучив зависимость $t = f\sqrt{S}$ для выбранных перегрузков. Для этого:

1. Поставьте на груз А перегрузок известной массы m_1 . Нажав кнопку "Пуск", определите на табло время падения t . Расстояние S , пройденное грузом, отмечено на стойке.
2. Повторите первый пункт 3–4 раза, найдите среднее время, $\langle t \rangle$, соответствующее данному расстоянию.
3. Выполните измерения пп. 1–2 с другими перегрузками m_2, m_3 (по указанию преподавателя).
4. Изменив расстояние 3–4 раза, повторите измерения, описанные в пунктах 1 – 3. Результаты измерений занесите в таблицу.
5. Для каждого перегрузка изобразите на общем графике зависимость $t = f\sqrt{S}$, сделайте вывод о характере движения и найдите ускорение a для данной массы m перегрузка.

Таблица. Результаты измерения времени движения перегрузков различной массы.

$m, \text{г}$	$S, \text{м}$	$t_1, \text{с}$	$t_1, \text{с}$	$t_1, \text{с}$	$\langle t \rangle, \text{с}$	$a, \text{м/с}^2$
m_1						
m_2						

m_3						

Примерный вид зависимости $t = f\sqrt{S}$ для перегрузка некоторой массы m приведен на рисунке 3:

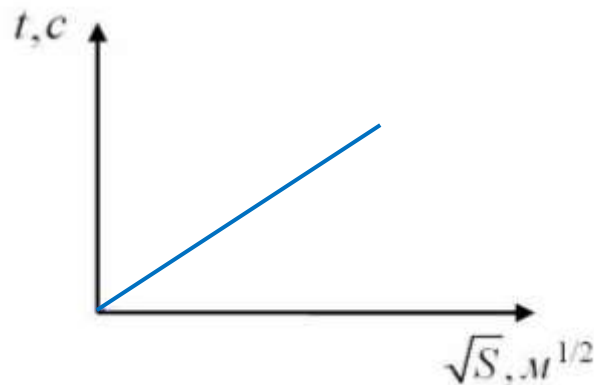


Рис. 3. Зависимость $t = f\sqrt{S}$

Контрольные вопросы

1. Дайте описание основных моделей механики: материальная точка, абсолютно твердое тело, сплошная среда.
2. Приведите примеры, в каких случаях можно применять модель материальной точки, а в каких случаях эта модель неприменима. Что такое путь, перемещение, траектория?
3. Перечислите способы описания механического движения.
4. Дайте определения средней скорости, мгновенной скорости; среднего и мгновенного ускорения. Запишите выражения для векторов мгновенной скорости и ускорения в разложении по ортам координатных осей.
5. Каковы свойства векторов скорости и ускорения? Приведите выражения для тангенциального и нормального ускорений.
6. Какое движение называется равномерным, а какое – равноускоренным? Приведите зависимости векторов скорости и перемещения от времени для этих движений.
7. Сформулируйте законы Ньютона.
8. В чем заключается принцип независимости действия сил?

9. Что такое вес тела? В чем отличие веса тела от силы тяжести?
10. Как объяснить состояние невесомости при свободном падении?
11. Известно, что сила тяготения пропорциональна массе тела. Почему же тяжелое тело, если на него действует только сила тяжести, не падает быстрее легкого?
12. Покажите, что силы тяготения консервативны.

Лабораторная работа № 2

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Цель работы: Экспериментальная проверка основного закона вращательного движения.

Оборудование, средства измерения: маятник Обербека, набор грузов, секундомер, линейка.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Вращательным движением твердого тела называется такое движение, при котором траектории всех точек твердого тела представляют собой концентрические окружности с центрами на одной прямой, называемой осью вращения (рис. 1).

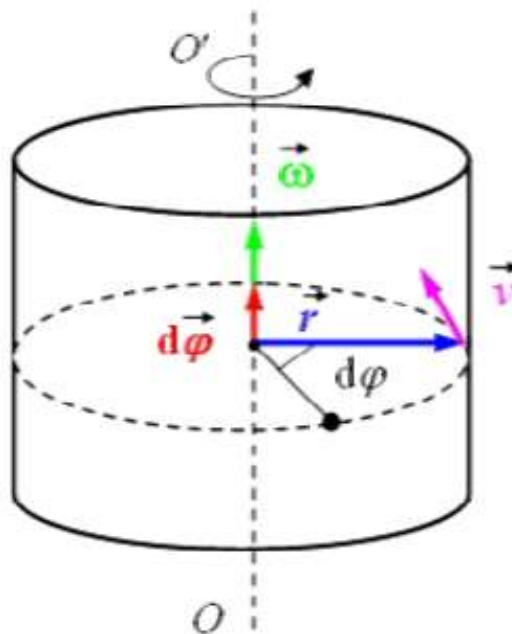


Рис. 1. Вращение твердого тела

При этом положение тела в любой момент времени определяется углом поворота φ . Вращение твердого тела характеризуется **угловой скоростью $\vec{\omega}$**

$$\vec{\omega} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}, \quad (1)$$

и угловым ускорением $\vec{\varepsilon}$

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

Вектор $\vec{\omega}$ направлен вдоль оси вращения, так же как и вектор $d\vec{\varphi}$, направление их определяется по правилу правого винта. Вектор $\vec{\varepsilon}$ направлен вдоль оси вращения в сторону вектора приращения угловой скорости.

Линейная скорость точки \vec{v} связана с угловой скоростью и радиус-вектором \vec{r} точки соотношением:

$$\vec{v} = [\vec{\omega}, \vec{r}]. \quad (3)$$

Связь линейного ускорения точки с угловым:

$$a = \frac{dv}{dt} = \varepsilon r. \quad (4)$$

При равномерном вращении

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{2\pi}{T} = \text{const}, \quad (5)$$

где T – период вращения.

Вращательное движение составляет, в частности, основу движений элементов опорно-двигательного аппарата человека и животных. Вращательное движение твердого тела совершается под действием сил, лежащих в плоскостях, перпендикулярных к оси вращения, и не проходящих через ось вращения. Мерой взаимодействия тел при вращательном движении является не сила, как при поступательном движении, а момент силы \vec{M} . Синонимы: вращающий момент, крутящий момент.

Моментом силы \vec{F} относительно неподвижной точки O называется физическая величина, определяемая векторным произведением радиус-вектора \vec{r} , проведенного из точки O в точку A приложения силы \vec{F} (рис. 2):

$$\vec{M} = [\vec{r}, \vec{F}]. \quad (6)$$

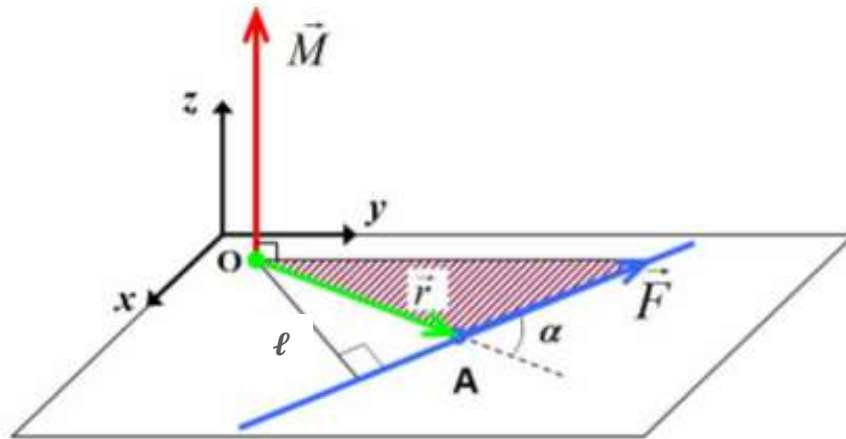


Рис. 2. К определению момента силы

Модуль момента силы рассчитывается по формуле:

$$M = F \cdot r \cdot \sin \alpha, \quad (7)$$

где $l = r \cdot \sin \alpha$ – плечо силы – кратчайшее расстояние между линией действия силы и точкой O ; α – угол между \vec{r} и \vec{F} .

Инертность тел при поступательном движении измеряется массой m . При вращательном движении мерой инертности служит другая величина – момент инерции I .

Момент инерции материальной точки равен произведению массы m на квадрат расстояния до оси вращения r :

$$I = m \cdot r^2. \quad (8)$$

Момент инерции – величина *аддитивная*: момент инерции всего тела равен сумме моментов инерции его отдельных частей. Поэтому **момент инерции системы** материальных точек относительно оси вращения

$$I = \sum_{i=1}^n m_i \cdot r_i^2, \quad (9)$$

где m_i – масса i -точки; r_i – расстояние i -точки до оси вращения.

В случае непрерывного распределения масс (твердого тела), тело можно представить в виде совокупности множества малых элементов (рис. 3), тогда приближенное значение момента инерции I можно найти с помощью формулы (9), т.е. проводя суммирование по всем элементам. При измельчении разбиения точность вычисления повышается и, переходя к бесконечно большому числу элементов, получаем интеграл:

$$J = \int_M r^2 dm = \int_V r^2 \rho(\vec{r}) dV. \quad (10)$$

В формуле (10) интегрирование производится по всей массе или объему твердого тела. Момент инерции тела зависит от того, относительно какой оси оно вращается и как распределена масса тела по объему.

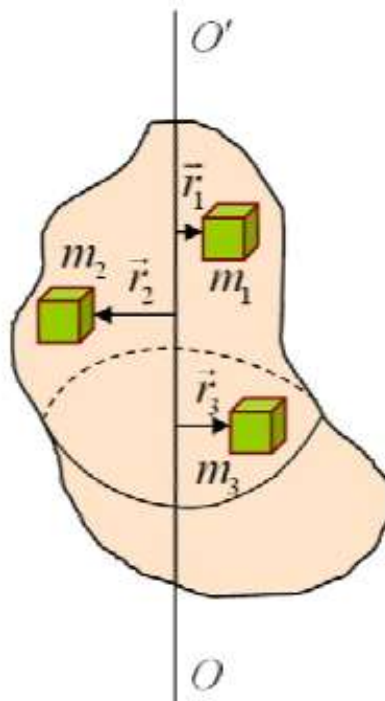


Рис. 3. Разбиение твердого тела на отдельные элементарные части для нахождения момента инерции по формуле (9).

Если ось вращения не проходит через центр масс тела, то используют **теорему Штейнера**:

$$I = I_o + md^2, \quad (11)$$

где J_o – момент инерции тела относительно оси, проходящей через центр масс и параллельной оси вращения; m – масса тела; d – расстояние между осями.

Опыт показывает, что при вращательном движении

$$\vec{\varepsilon} = \frac{\vec{M}}{I}. \quad (12)$$

(12) – это **основное уравнение динамики вращательного движения** (2 закон Ньютона для вращательного движения). Именно его и необходимо проверить в данной работе.

В обобщенном виде второй закон Ньютона для вращательного движения запишется в виде

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}, \quad (13)$$

где $d\vec{L}$ – момент импульса твердого тела $d\vec{L} = I\vec{\omega}$.

Внимание! Математическая форма записи основных закономерностей для поступательного и вращательного движений остается неизменной.

Сравните!

Поступательное движение		Вращательное движение	
Масса	m	Момент инерции	I
Перемещение	$d\vec{r}$	Угловое перемещение	$d\vec{\varphi}$
Скорость	\vec{v}	Угловая скорость	$\vec{\omega}$
Ускорение	\vec{a}	Угловое ускорение	$\vec{\varepsilon}$
Сила	\vec{F}	Момент силы	$\vec{M} = [\vec{r}, \vec{F}]$
Импульс	$\vec{p} = m\vec{v}$	Момент импульса	$d\vec{L} = I\vec{\omega}$
Работа	$dA = F_S dS$	Работа	$dA = M_z d\varphi$
Кинетическая энергия	$\frac{mv^2}{2}$	Кинетическая энергия	$\frac{I\omega^2}{2}$

Поступательное движение		Вращательное движение	
Основное уравнение динамики	$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$	Основное уравнение динамики	$\vec{\varepsilon} = \frac{\vec{M}}{I}$
	$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$		$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt}$

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Работа выполняется с помощью маятника Обербека (рис. 4). Вращающаяся часть установки состоит из четырех спиц, укрепленных на втулке под прямым углом друг к другу. На ось втулки насажены два легких шкива различных радиусов $r_1 = 9,3$ мм и $r_2 = 17,5$ мм. Вращение происходит вокруг горизонтальной оси. Момент инерции системы относительно оси вращения можно изменить, либо изменяя массы грузиков, укрепленных на спицах, либо перемещая грузики вдоль спиц.

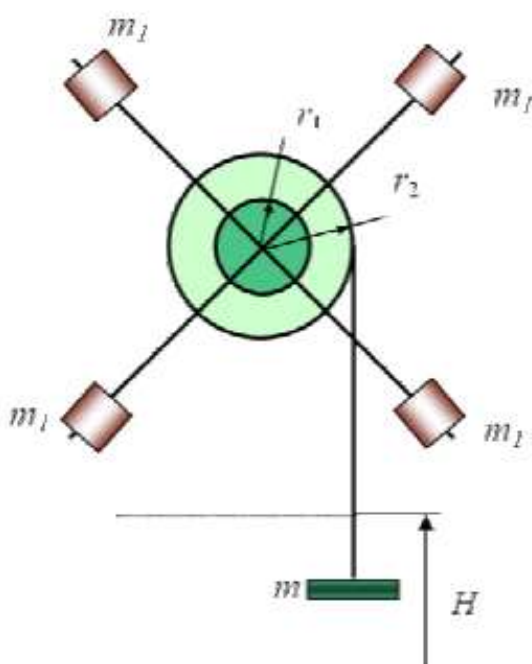


Рис. 4. Маятник Обербека

Каждый раз, закрепляя грузики на спицах на определенном расстоянии от оси вращения, необходимо **проверить, правильно ли сбалансирована система**, т. е. находится ли она в безразличном равновесии.

Момент силы, вызывающий вращение маятника, создается натяжением нити, навитой на один из шкивов установки, к которой привязан груз m . Момент силы можно изменять, подвешивая к нити грузы различной массы или изменяя плечо силы, для чего нить закреп-

ляется на шкивах разного диаметра.

Под действием груза нить разматывается и приводит во вращение крестовину маятника. Измеряя время t , в течение которого груз m из состояния покоя опустится на расстояние H , можно определить линейное ускорение:

$$a = \frac{2H}{t^2}. \quad (14)$$

Зная радиус шкива можно найти угловое ускорение:

$$\varepsilon = \frac{a}{r}. \quad (15)$$

Если через T обозначить силу натяжения нити, то во время равноускоренного падения груза ее величина будет равна:

$$T = mg - ma = m(g - a). \quad (16)$$

Следовательно, вращающий момент относительно оси вращения установки будет:

$$M = T \cdot r = m(g - a)r. \quad (17)$$

Моментом сил трения пренебрегаем.

Задача. Вам необходимо экспериментально установить характер зависимости углового ускорения вращения маятника ε от

а) момента силы M (M_1, M_2, M_3)

б) момента инерции I (I_1, I_2, I_3)

Ожидаемые результаты представлены на рис. 5.

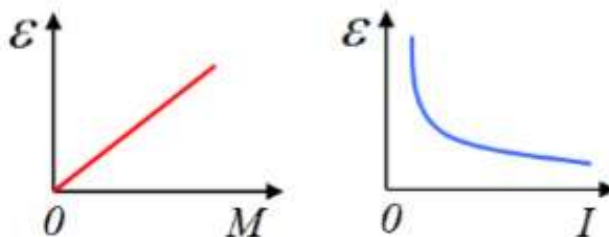


Рис. 5. Теоретические зависимости измеряемых величин

ВЫПОЛНЕНИЕ ОПЫТА




1. Установите грузы на спицах на одинаковых расстояниях от оси вращения. Оставляя неизменным момент инерции системы $I = const$, определите значения угловых ускорений при трех различных значениях вращающего момента, изменяя массу грузов m . Результаты эксперимента занесите в таблицу и затем представьте в виде графика $\varepsilon = f(M)$. Пользуясь этой зависимостью, определите момент инерции системы.

2. Повторите весь эксперимент не менее чем для трех различных значений моментов инерции системы и результаты нанесите на тот же график.

3. Пользуясь построенным графиком, определите для одного из значений вращающего момента величину угловых ускорений при различных моментах инерции маятника. Полученные результаты представьте в виде графика, откладывая по оси абсцисс величину момента инерции, а по оси ординат – угловое ускорение $\varepsilon = f(I)$. Сделайте вывод.

4. Укажите возможные причины ошибок эксперимента.

Таблица результатов измерений и расчетов

Положение грузов на спицах	m , кг	t , с	a , м/с ²	T , Н	M , Н·м	ε , с ⁻²	I , кг·м ²
	$m_1 = \dots$ $m_2 = \dots$ $m_3 = \dots$						
	$m_1 = \dots$ $m_2 = \dots$ $m_3 = \dots$						
	$m_1 = \dots$ $m_2 = \dots$ $m_3 = \dots$						

Контрольные вопросы

1. Дайте определение физических величин, необходимых для описания вращательного движения тел (углового перемещения, угловой скорости, углового ускорения), и укажите их единицы измерения.
2. Каково расположение в пространстве векторов углового перемещения, угловой скорости, углового ускорения?
3. Дайте определение момента силы относительно неподвижной точки, момента силы относительно неподвижной оси. Как определяется направление момента силы?
4. Что такое момент импульса материальной точки? твердого тела? Как определяется направление момента импульса?
5. Дайте определение момента инерции (для единичной материальной точки, системы материальных точек и твердого тела).
6. Сформулируйте 2-й закон Ньютона для поступательного и вращательного движений.
7. Какова роль момента инерции во вращательном движении?
8. Что общего, и каково различие в понятиях «масса» и «момент инерции»?
9. Как можно определить момент инерции тела относительно произвольной оси, если известен его момент инерции относительно оси симметрии, параллельной произвольной оси?
10. Путем прямого сопоставления покажите, что выражения основных закономерностей для поступательного и вращательного движений имеют одну и ту же математическую форму.
11. Опишите экспериментальную установку (маятник Обербека) и приведите формулы для определения линейного и углового ускорения закрепленного на конце нити груза, а также формулы для силы натяжения нити и вращающего момента. Объясните, как получена формула (16).
12. Как можно рассчитать момент инерции маятника Обербека?
13. В чем заключается физическая сущность закона сохранения момента импульса? В каких системах он выполняется? Приведите примеры.
14. Какова формула для кинетической энергии тела, вращающегося вокруг неподвижной оси?

Лабораторная работа № 6

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ (Исследование упругих и неупругих столкновений)

Цель: Проверить экспериментально справедливость законов сохранения импульса и энергии в задачах о неупругих и упругих столкновениях тел.

Оборудование, средства измерения: установка с набором шаров на подвесах, весы, разновесы.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Когда говорят о столкновении, то подразумевают такое взаимодействие между телами, которое происходит в течение относительно малого промежутка времени в относительно малой области пространства. Другое название таких взаимодействий – удар (столкновение).

В процессе удара происходит весьма быстрое перераспределение энергии между соударяющимися телами, так что каждое из них после удара будет обладать иной величиной энергии, чем до удара. Дело в том, что при ударе оба тела деформируются, и в результате возникают силы взаимодействия, препятствующие деформациям, т.е. направленные противоположно относительным скоростям соударяющихся тел.

В физике различают два предельных типа удара: абсолютно упругий удар (АУУ); абсолютно неупругий удар (АНУ). *Абсолютно упругим ударом* называется такой удар, при котором механическая энергия тел не переходит в другие немеханические виды энергии. При таком ударе кинетическая энергия переходит полностью или частично в потенциальную энергию упругой деформации. Затем тела возвращаются к первоначальной форме, отталкивая друг друга. В итоге потенциальная энергия упругой деформации снова переходит в кинетическую энергию, и тела разлетаются со скоростями, величина и направление которых определяются двумя условиями – сохранением полной механической энергии и сохранением полного импульса системы.

Абсолютно неупругий удар характеризуется тем, что потенциальной энергии деформации не возникает; кинетическая энергия

тел полностью или частично превращается во внутреннюю энергию; после удара столкнувшиеся тела либо движутся с одинаковой скоростью, либо покоятся.

Реально в природе абсолютно упругих и абсолютно неупругих тел не существует. Тем не менее, количественные результаты теоретического исследования явления удара в обеих предельных схемах во многих случаях отображают действительные процессы удара с достаточной точностью. Столкновения, происходящие на атомном уровне, т.е. столкновения между атомами, ядрами и элементарными частицами, во многих случаях можно считать упругими. Однако в макроскопическом мире, с которым мы имеем дело повседневно, абсолютно упругое столкновение – это практически недостижимый идеальный случай, который никогда полностью не реализуется, поскольку в процессе столкновения по крайней мере небольшая часть энергии всегда переходит в тепловую энергию (возможно также в энергию звука или другие аналогичные формы энергии). Тем не менее, при столкновении двух упругих твердых (т.е. обладающих очень малой деформацией) шаров, изготовленных из слоновой кости, закаленной стали, некоторых пластмасс и т.д., упругие свойства выражены настолько сильно, что играют решающую роль в ходе столкновения.

К неупругим телам можно отнести, например, шары, изготовленные из мягкой глины, пластилина, свинца и других пластических материалов.

Рассмотрим законы сохранения импульса и механической энергии:

1. Импульс замкнутой системы есть величина постоянная

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot \vec{v}_i = const. \quad (1)$$

2. Если в замкнутой системе диссипативные силы отсутствуют, то ее полная механическая энергия сохраняется

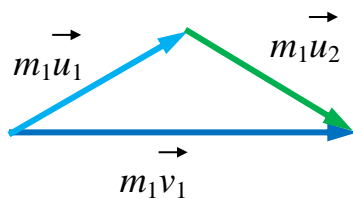
$$E_{\text{полн}} = E_{\text{к}} + U = const. \quad (2)$$

Под диссипативными силами понимаются силы трения и сопротивления.

Рассмотрим упругое соударение двух тел с массами m_1 и m_2 , скорость первого тела до удара \vec{v}_1 , второе тело покоится; скорости тел после удара, соответственно, \vec{u}_1 и \vec{u}_2 .

Запишем закон сохранения импульса в векторной форме (см. рис. 1)

$$m_1 \vec{v}_1 = m_1 \vec{u}_1 + m_2 \vec{u}_2, \quad (3)$$



и закон сохранения энергии

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2} \quad (4)$$

Рис. 1. Закон сохранения импульса

Рассмотрим применение законов сохранения импульса и энергии к **центральному абсолютно упругому** столкновению двух шаров. Центральным называют удар, при котором все движения происходят вдоль одной линии, проходящей через центр масс (рис. 2).

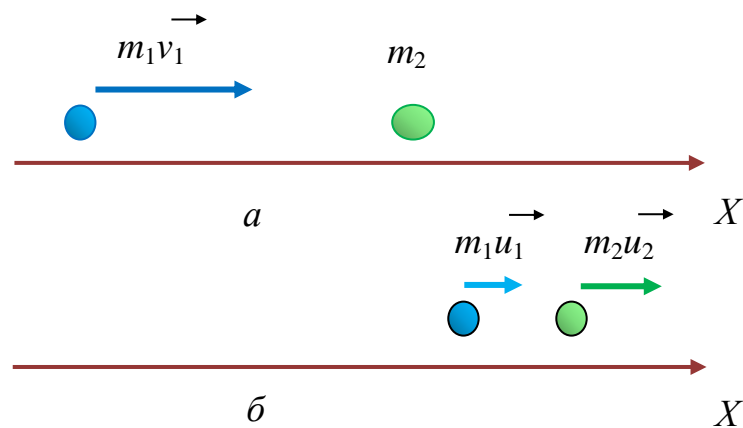


Рис. 2. Упругое столкновение двух частиц

В проекции на ось X закон сохранения импульса:

$$m_1 v_1 = m_1 u_1 + m_2 u_2 \quad (5)$$

Поскольку столкновение предполагается упругим, кинетическая энергия также сохраняется:

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2} \quad (6)$$

Решая совместно уравнения (5) и (6), получим выражения для скоростей шаров после удара:

$$u_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1; \quad u_2 = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1. \quad (7)$$

Налетающий шар будет продолжать движение в том же направлении или же изменит свое направление на обратное в зависимости от того, больше ли его масса m_1 массы первоначально покоящегося шара массой m_2 или меньше. Если массы m_1 и m_2 одинаковы, то $u_1 = 0$, $u_2 = v_1$. Для $m_2 \gg m_1$ имеем $u_1 = v_1$ и $u_2 = 0$.

Для **неупругого центрального соударения** двух шаров уравнение закона сохранения импульса:

$$m_1 v_1 = (m_1 + m_2)u \quad (8)$$

откуда

$$u = \frac{m_1}{(m_1 + m_2)} v_1. \quad (9)$$

Кинетическая энергия системы при неупругом ударе уменьшается. Действительно до удара имеем:

$$E_k = \frac{m_1 v_1^2}{2}, \quad (10)$$

после удара

$$E'_k = \frac{m_1 + m_2}{2} u^2 = \frac{1}{2} \frac{m_1^2}{(m_1 + m_2)} v_1^2. \quad (11)$$

Убыль кинетической энергии

$$E_k - E'_k = \frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2)} v_1^2$$

ведет к увеличению внутренней энергии системы.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

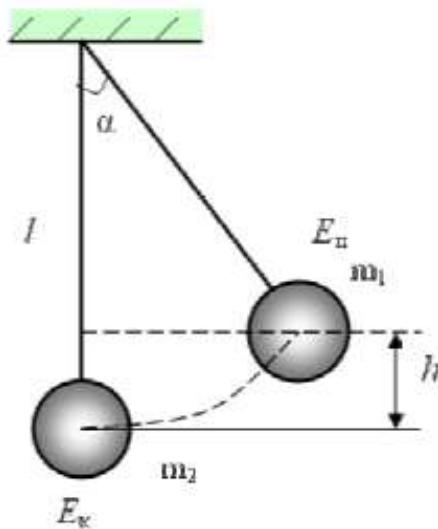


Рис. 3. К выводу формулы (12).

Установка представляет собой два маятника равной длины с одинаковыми или разными шарами из набора. Правый шар, удерживаемый электромагнитом, бьёт при выключении электромагнита по покоящемуся шару.

Мерой скорости шара служит величина отброса, отсчитываемого по круговой шкале. Такой метод измерения скорости называется баллистическим (рис. 3). Нетрудно сообразить, что скорость при этом может быть рассчитана по формуле:

при этом может быть рассчитана по формуле:

$$v = 2\sqrt{g\ell} \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (12)$$

где: g – ускорение свободного падения, ℓ – длина подвеса, α – угол отброса по шкале.

Технические данные установки: длина подвеса $\ell = (0,45 \pm 0,005)$ м. Массы стальных шаров: $m_{c1} = 172$ г, $m_{c2} = 170$ г. Масса пластилинового шара $m_{п} = 40$ г.

Формула (12) является рабочей формулой для расчета скоростей движущихся шаров в настоящей работе.

ВЫПОЛНЕНИЕ ОПЫТА

1. Подберите шары для проведения измерений, при упругом ударе.
2. Включите прибор, нажав кнопку «сеть».

3. Правый стальной шар m_1 отодвинуть в сторону электромагнита и заблокировать его в этом положении. Записать значение угла α_0 .
4. Нажать кнопку «сеть». После столкновения шаров, наблюдать на какие углы α_1 и α_2 они отклонятся.
5. Измерения провести не менее 10 раз, и определить среднее значение углов α_1 и α_2 .
6. Заменить шар m_2 на пластилиновый. Повторить измерения по п.п. 2–5.
7. Найти скорости шаров до и после столкновения по формуле (12).
8. Сравнить импульсы системы до столкновения и после него, используя формулы (5) и (8).
9. Рассчитать коэффициент восстановления энергии системы по формуле

$$K = \frac{E'_k}{E_k},$$

- где E'_k и E_k – соответственно кинетическая энергия системы до и после удара. Так как до столкновения во всех опытах движется только один шар m_1 , то величина E_k определяется кинетической энергией бьющего шара: $E_k = \frac{m_1 v_1^2}{2}$. После столкновения движутся оба шара, поэтому энергия системы имеет два слагаемых $E'_k = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2}$.
10. Представить результаты измерений в виде таблицы, сделать вывод.

Таблица результатов измерений и расчетов

№ п/п	α_0	α_1	α_2	v_1	u_1	u_2	$m_1 v_1$	$m_1 u_1$	$m_2 u_2$	$\frac{m_1 v_1^2}{2}$	$\frac{m_1 u_1^2}{2}$	$\frac{m_2 u_2^2}{2}$	К
Упругий удар													
Неупругий удар													

В таблице введены следующие обозначения для скоростей: v_1 – скорость бьющего шара перед столкновением, u_1 – скорость бьющего шара после столкновения, u_2 – скорость второго (покоившегося до удара) после столкновения.

Контрольные вопросы.

1. Что называется механической системой? Какая система является замкнутой?
2. Дайте определения кинетической и потенциальной энергии. По каким формулам вычисляется кинетическая энергия поступательного и вращательного движения твердого тела? Чему равна потенциальная энергия тела в поле тяжести Земли?
3. Какие взаимодействия называют столкновением?
4. Какие характеристики ударов вы знаете?
5. Почему коэффициент восстановления кинетической энергии в опытах $K < 1$?
6. В чем заключается закон сохранения импульса? В каких системах он выполняется? Почему он является фундаментальным законом природы?
7. Каким свойством пространства обуславливается справедливость закона сохранения импульса?
8. В чем различие между понятиями энергии и работы?
9. Сформулируйте теорему о связи работы и энергии.
10. Покажите, что силы тяготения, (тяжести, упругости) консервативны.
11. Сформулируйте закон сохранения механической энергии? Для каких систем он выполняется?
12. В чем физическая сущность закона сохранения и превращения энергии? Почему он является фундаментальным законом природы?
13. Каким свойством времени обуславливается справедливость закона сохранения механической энергии?
14. Чем отличается абсолютно упругий удар от абсолютно неупругого?
15. Как определить скорости тел после центрального абсолютно упругого удара? Следствием каких законов являются эти выражения?

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Лабораторная работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЛЯРНОЙ МАССЫ И ПЛОТНОСТИ ГАЗА МЕТОДОМ ОТКАЧКИ

Цель работы: Определение молярной массы и плотности воздуха.

Оборудование, средства измерения: Экспериментальная установка ФПТ 1-12

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Молярной (молекулярной) массой называется масса одного моля вещества. В системе СИ эта величина измеряется в кг/моль. *Моль* – это количество вещества, содержащее столько же структурных элементов (молекул, атомов и т.д.), сколько атомов содержится в 0,012 кг изотопа углерода ^{12}C . Молекулярную (молярную) массу можно определить из уравнения состояния идеального газа.

При нормальных условиях реальные газы можно рассматривать в приближении модели идеального газа. Состояние идеального газа описывается уравнением Менделеева Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{\mu} RT, \quad (1)$$

где p – давление газа, V – объем газа, m – масса газа, μ – молярная масса газа, $R = 8,31$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура газа.

Из уравнения (1) можно получить формулу для молярной массы газа

$$\mu = \frac{mRT}{pV} \quad (2)$$

Если измерение основных параметров газа – давления p , объема V и температуры T не вызывает особых трудностей, то определение массы газа выполнить практически невозможно, так как взвешивание газа возможно только вместе с сосудом, в котором он находится. Поэтому для определения μ необходимо исключить массу сосуда. Это можно сделать, рассмотрев уравнение со-

стояния двух масс m_1 и m_2 одного и того же газа при одинаковых температурах T и объемах V .

Пусть в колбе объемом V находится газ массой m_1 при давлении p_1 и температуре T . Уравнение состояния (1) для этого газа имеет вид

$$p_1 V = \frac{m_1}{\mu} RT \quad (3)$$

Откачаем часть газа из колбы, не изменяя его температуру. После откачки масса газа в колбе и его давление уменьшились. Обозначим их соответственно m_2 и p_2 и запишем уравнение состояния

$$p_2 V = \frac{m_2}{\mu} RT \quad (4)$$

Из уравнений (3) и (4) получим

$$\mu = \frac{m_1 - m_2}{p_1 - p_2} \cdot \frac{RT}{V} \quad (5)$$

Полученная формула (5) дает возможность определить μ , если известно изменение массы (но не сама масса), а также изменение давления, температура и объем газа.

В данной лабораторной работе исследуемым газом является воздух, который представляет собой смесь газов – азота, кислорода, аргона и некоторых других газов. Формула (5) пригодна и для определения молярной массы μ смеси газов. Найденное в этом случае значение μ представляет собой среднюю или эффективную молярную массу смеси газов. Молярная масса смеси газов μ_c может быть рассчитана и теоретически, если известно процентное содержание и молярная масса каждого из газов, входящих в смесь, по формуле

$$\mu_c = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{m} \cdot \frac{1}{\mu_i}} \quad (6)$$

где $\frac{m_i}{m}$ – относительное содержание каждого газа, μ_i – молярные массы компонентов смеси, $m = \sum_{i=1}^n m_i$.

Если известна молярная масса газа, то можно легко определить еще одну важную характеристику газа – его плотность ρ . Плотность газа – это масса единицы объема газа

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (7)$$

Определив $\frac{m}{V}$ из уравнения Менделеева-Клапейрона, получим

$$\rho = \frac{p\mu}{RT} \quad (8)$$

Плотность смеси газов можно вычислить по формуле (8), подразумеваемая под μ эффективную молярную массу смеси μ_c .

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для определения молярной массы воздуха предназначена экспериментальная установка ФПТ1-12, блок-схема которой приведена на рис. 1.

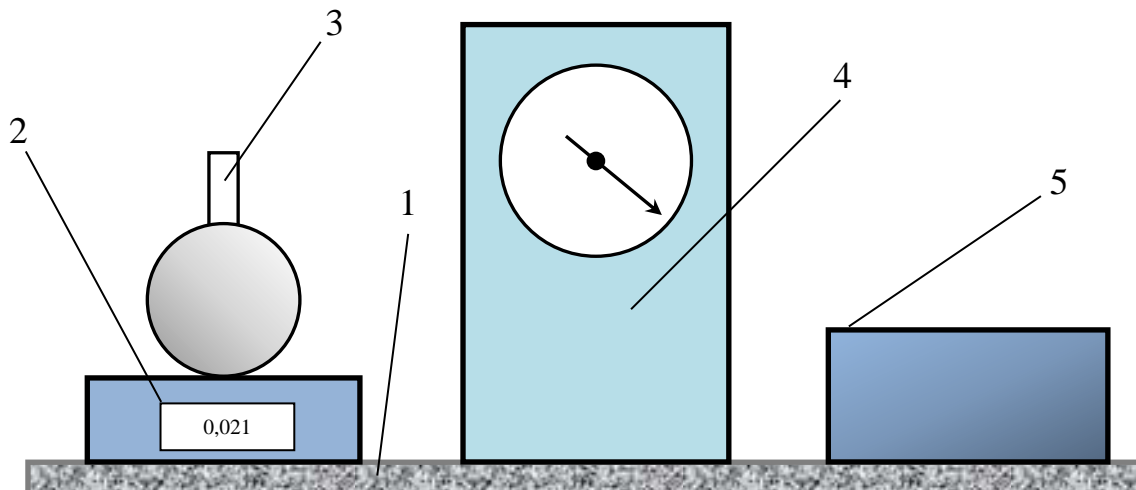


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки ФПТ1-12

1 – стойка; 2 – весы; 3 – колба; 4 – вакуумметр; 5 – компрессор.

Рабочим элементом установки является стеклянная колба 3, соединенная со стрелочным вакуумметром 4, показания которого p есть разность между атмосферным давлением в лаборатории p_0 и давлением газа в колбе p_K . Колба имеет отросток с краном, который с помощью резиновой трубки соединяется с входным патрубком компрессора 5. Колба установлена на тарелке электрон-

ных весов. Значение объема колбы V указано в паспорте экспериментальной установки на рабочем месте.

ВЫПОЛНЕНИЕ ОПЫТА

1. Подать напряжение питания на электронные весы, включив установку тумблером "Сеть".
2. С помощью электронных весов определить массу колбы с воздухом ($m_0 + m_1$) при давлении p_1 .
3. Включив компрессор тумблером "Пуск" и, открыв кран, откачать воздух из колбы до давления p_2 , после чего, закрыв кран и выключив компрессор, определить с помощью весов массу колбы с воздухом ($m_0 + m_2$) при давлении p_2 . Полученные результаты занести в таблицу.
4. Повторить измерения по пунктам 2 – 3 не менее 3 раз.
5. Измерить температуру воздуха в лаборатории.
6. Выключить установку тумблером "Сеть".

Таблица результатов измерений и расчетов

№ п/п	$m_0 + m_1$, кг	$m_0 + m_2$, кг	$m_1 - m_2$, кг	p_1 , Па	p_2 , Па	$p_1 - p_2$, Па	T , К	μ , кг/моль	ρ , кг/м ³
1.									
2.									
3.									

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Для каждого проведенного измерения определить массу откачанного воздуха ($m_1 - m_2$) и разность давлений ($p_1 - p_2$).
2. По формуле (5) вычислить для каждого измерения значение молярной массы воздуха μ . Найти среднее значение $\langle \mu \rangle$.
3. По формуле (8) вычислить для каждого измерения плотность воздуха, используя найденное значение молярной массы μ .
4. Оценить погрешность результатов измерений.

Контрольные вопросы

1. Что такое молярная масса вещества и в каких единицах она измеряется?

2. Запишите и объясните смысл всех физических величин, входящих в уравнение Менделеева-Клапейрона. В каких случаях его можно использовать для практических вычислений?
3. Как теоретически рассчитать молекулярную массу газа?
4. Что такое плотность газа и как ее можно определить экспериментально?
5. Выведите расчетную формулу для определения молярной массы, которая используется в данной работе.
6. Почему молярную массу газа нельзя определить непосредственно, используя уравнение Менделеева-Клапейрона?
7. В чем заключается метод откачки для определения молярной массы газа?
8. Укажите основные источники погрешностей данного метода измерения молярной массы и плотности газа.

Лабораторная работа № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ МЕТОДОМ КЛЕМАНА И ДЕЗОРМА

Цель работы: опытным путем определить отношение теплоемкостей воздуха и сравнить с расчетным значением.

Оборудование, средства измерения: сосуд большой емкости, кран, насос, жидкостный манометр.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

При решении конкретных задач термодинамики пользуются понятиями теплоемкости, удельной $c_{уд}$ или молярной теплоемкости C .

Удельной теплоемкостью называют величину, численно равную количеству теплоты, необходимому для повышения температуры единицы массы вещества на 1 градус

$$c_{уд} = \frac{\delta Q}{m dT} = \frac{1}{m} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta T}. \quad (1)$$

Молярной теплоемкостью называется величина, численно равная количеству теплоты, необходимому для повышения температуры одного моля (или одного киломоля) вещества на 1 градус

$$C = \frac{\delta Q}{\frac{m}{\mu} dT} = \frac{\mu}{m} \cdot \frac{\delta Q}{dT}. \quad (2)$$

$$C = \mu c_{уд}. \quad (3)$$

Из первого закона термодинамики

$$\delta Q = dU + \delta A, \quad (4)$$

где δQ – элементарное количество теплоты, подводимое к системе; dU – изменение внутренней энергии системы; δA – элементарная работа, производимая при этом системой, следует, что ко-

личество теплоты, необходимое для изменения температуры системы на dT градусов, зависит от характера происходящего при этом процесса. Поэтому теплоемкость системы также зависит от условий, при которых определяется отношение $\frac{\delta Q}{dT}$.

Наибольшее практическое значение имеют теплоемкости при постоянном объеме (C_v) и при постоянном давлении (C_p):

1. Теплоемкость C_p при $P = \text{const}$, когда $\delta Q_p = dU + \delta A$ ($\delta A \neq 0$);
2. Теплоемкость C_v при $V = \text{const}$, когда $\delta Q_v = dU$ ($\delta A = 0$).

Тогда из определения теплоемкости (2):

$$C_p = \frac{\mu}{m} \cdot \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_p = \frac{\mu}{m} \cdot \left(\frac{dU + \delta A}{dT} \right) \quad (5)$$

$$C_v = \frac{\mu}{m} \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_v = \frac{\mu}{m} \left(\frac{dU}{dT} \right) \quad (6)$$

Из сравнения формул (5) и (6), очевидно, что $C_p > C_v$. Эта разница отражена в величине:

$$\gamma = C_p / C_v \quad (7)$$

Отношение (7) называется *коэффициентом Пуассона*. Экспериментально его можно определить несколькими методами. Метод Клемана–Дезорма – самый простой метод расчета γ . Коэффициент Пуассона также входит в уравнение Пуассона для описания адиабатического процесса ($\delta Q = 0$):

$$PV^\gamma = \text{Const} \quad (8)$$

и, кроме того, коэффициент γ связан с числом степеней свободы молекул данного вещества – i .

Причем изменение внутренней энергии идеального газа:

$$dU = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R dT; \quad (9)$$

элементарная работа, производимая газом:

$$\delta A = PdV = \frac{m}{\mu} R dT. \quad (10)$$

Подставляя формулы (9) и (10) в (5), (6), получим значение молярных теплоемкостей:

а) для изохорического процесса ($V = \text{const}$)

$$C_V = \frac{i}{2}R, \quad (11)$$

б) для изобарического процесса ($P = \text{const}$)

$$C_P = \frac{i+2}{2}, \quad (12)$$

в) для изотермического процесса ($T = \text{const}$)

$$C_T \rightarrow \infty. \quad (13)$$

Таким образом, коэффициент Пуассона выражается:

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{i+2}{i}, \quad (14)$$

Измерение $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$ для газов позволяет без всяких микроскопов оценить структуру молекулы газа! Этого же можно добиться, сравнивая экспериментальное значение γ с расчетным (теоретическим).

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка представлена на рис. 1. Установка состоит из сосуда А большой емкости, насоса Н и манометра М. Сосуд А при помощи крана К может соединяться с насосом Н или окружающей атмосферой. Чтобы в сосуд А не попадали пары воды, находящиеся в окружающей среде, воздух предварительно пропускают через осушитель О, а на дно сосуда А наливают концентрированную серную кислоту, которая хорошо поглощает пары влаги. Измерение давления в сосуде производится с помощью жидкостного манометра М.

Перед началом опыта сосуд А соединен с атмосферой, поэтому давление воздуха в нем равно атмосферному давлению p_0 , а температура газа в сосуде совпадает с температурой окружающей среды T_1 .

1 ЭТАП В сосуд с помощью насоса Н накачивают воздух, затем дают ему охладиться до температуры окружающей среды.

2 ЭТАП С помощью крана К сосуд соединяют с атмосферой.

Давление начнет выравниваться с атмосферным, а температура сначала несколько понизится из-за расширения газа, затем начнет приближаться к комнатной. Можно подобрать время открытия крана таким, чтобы не успевал произойти процесс теплообмена с окружающей средой, и расширение будет адиабатическим.

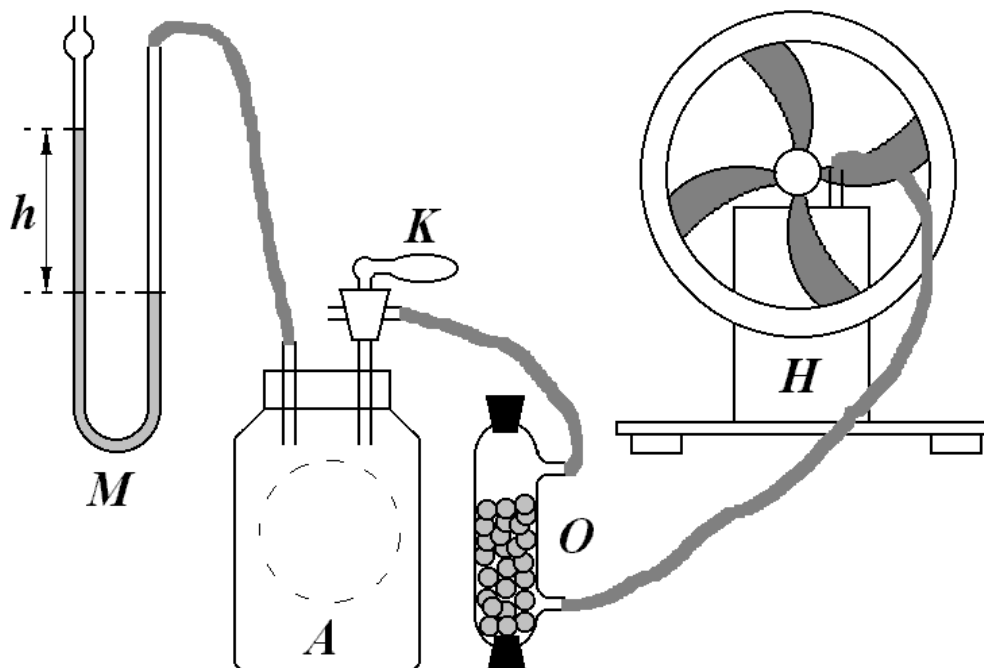


Рис. 1. Схема установки для определения C_p/C_v методом Клемана и Дезорма

А – сосуд; О – осушитель; М – манометр; К – кран; соединяющий сосуд с насосом или атмосферой; Н – насос.

Уравнение Пуассона в параметрах Р и Т (8) примет вид:

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\gamma}. \quad (15)$$

В конце этого процесса давление P_2 будет равно атмосферному P_0 , а температура T_2 окажется несколько ниже комнатной T_1 .

3 ЭТАП Сосуд отключают от атмосферы. Начнется медленное изохорное нагревание газа ($T_2 \rightarrow T_1$). Этот процесс описывается законом Гей–Люссака:

$$\frac{P_2}{T_2} = \frac{P_3}{T_3} = \frac{P_1}{T_1}. \quad (16)$$

Исключение (T_1/T_2) из (15) совместно с (16) приводит к выражению:

$$\gamma = \frac{\ln \frac{P_1}{P_0}}{\ln \frac{P_1}{P_3}} \approx \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (17)$$

В нашем случае P_1 и P_3 мало отличаются от P_0 и упрощение (17) связано с обозначением:

$$P_1 = P_0 + h_1, \quad P_3 = P_0 + h_2$$

и разложением логарифмов в ряд с пренебрежением членами второго порядка малости.

Таким образом, коэффициент Пуассона γ можно рассчитать по формуле

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2} \quad (18)$$

ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

При закрытом кране К накачайте воздух в сосуд А, так, чтобы не превысить максимального уровня манометра М. Затем закройте кран К и выждите 1–2 минуты, пока воздух, нагретый при адиабатическом сжатии, охладится до температуры окружающей среды (перемещение уровней жидкости в коленах манометра прекратится). После этого произведите отсчет разности высот жидкости в манометре h_1 (удобнее использовать нижнюю часть мениска жидкости).

2. Откройте кран К и в момент, когда прекращается шипение, быстро закройте. Выждав 2 минуты, пока воздух, охлажденный при адиабатическом расширении, нагревается до температуры окружающей среды (перемещение уровней жидкостей в манометре прекратится), произведите отсчет разности уровней жидкости h_2 .

3. Повторите измерения пп. 1–2 не менее 5 раз. Результаты всех измерений h_1 и h_2 занесите в таблицу.

4. По формуле (18) вычислите для каждого опыта значение γ .

5. Полученные результаты по определению γ занесите в таблицу и оцените ошибку измерения, сравнив значение $\langle \gamma \rangle$ с теоретическим значением γ_T , которое следует рассчитать по формуле (14), принимая воздух за многоатомный газ с числом степеней свободы $i = 5$.

6. Оцените погрешность определения γ .

Таблица результатов измерений и расчетов

№ п/п	h_1	h_2	γ	$\langle \gamma \rangle$	$\varepsilon = \frac{\gamma_T - \langle \gamma \rangle}{\gamma_T}$

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятий «внутренняя энергия», «теплота», «работа».
2. Сформулируйте первое начало термодинамики? Как математически записывается этот закон?
3. Что называется теплоемкостью? Чем отличаются удельная и молярная теплоемкости?
4. Используя математическое выражение первого начала термодинамики, найдите связь между C_p и C_v . В чем физическая причина различия между ними?
5. Сформулируйте второй закон термодинамики.
6. Зная коэффициент Пуассона γ , как можно рассчитать число степеней свободы газа?
7. Каким физическим и математическим условием должна удовлетворять величина, которую можно называть функцией состояния системы? Какие термодинамические величины являются функциями состояния?
8. Какие термодинамические процессы вам известны, и какими уравнениями они описываются? Нарисуйте на PV -диаграмме графики этих процессов.
9. В каком термодинамическом процессе приращение внутренней энергии системы равно подведенному к системе количеству тепла?
10. В каких случаях внутренняя энергия системы постоянна?

11. В каких случаях изменение внутренней энергии системы равно внешней работе, совершенной системой?
12. Что такое энтропия? Каков ее физический смысл?
13. Запишите основное неравенство и основное уравнение термодинамики. Какие процессы называются равновесными, а какие – неравновесными?
14. Запишите число степеней свободы для вращательного и колебательного движения многоатомных линейных и нелинейных молекул (считая, что число атомов в молекуле равно n).
15. Запишите значение внутренней энергии одного моля идеального газа, состоящего из многоатомных линейных и нелинейных молекул.

Лабораторная работа № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПО МЕТОДУ СТОКСА

Цель работы: освоить один из экспериментальных методов измерения коэффициента внутреннего трения жидкости.

Оборудование, средства измерения: стеклянный цилиндр с исследуемой жидкостью (глицерин); секундомер; измерительный микроскоп; масштабная линейка; мелкие свинцовые или стальные шарики.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Явление внутреннего трения (вязкость) состоит в возникновении сил трения между слоями газа и жидкости при их относительном перемещении. Рассмотрим жидкость, движущуюся по трубке (рис. 1). Весь объем жидкости можно представить состоящим из тонких параллельных слоев, движущихся с разными скоростями. Действие сил межмолекулярного сцепления приводит к тому, что самый нижний слой приклеивается к трубке и является неподвижным. Остальные слои движутся со скоростями тем большими, чем дальше они расположены от поверхности трубки. Со стороны более низкого слоя на соседний более высокий слой действуют силы трения, замедляющие его движение, и наоборот – верхний слой ускоряет движение нижнего. Сила внутреннего трения выражается формулой Ньютона (полученной И. Ньютоном в 1687 г.):

$$dF = -\eta \frac{du}{dz} ds, \quad (1)$$

где η – коэффициент динамической вязкости; $\frac{du}{dz}$ – величина, показывающая, как быстро изменяется скорость жидкости или газа в направлении оси Z , перпендикулярном направлению движения слоев. Эта величина называется градиентом скорости (обозначается $grad u$); dS – элементарная площадка поверхности соприкасающихся слоев.

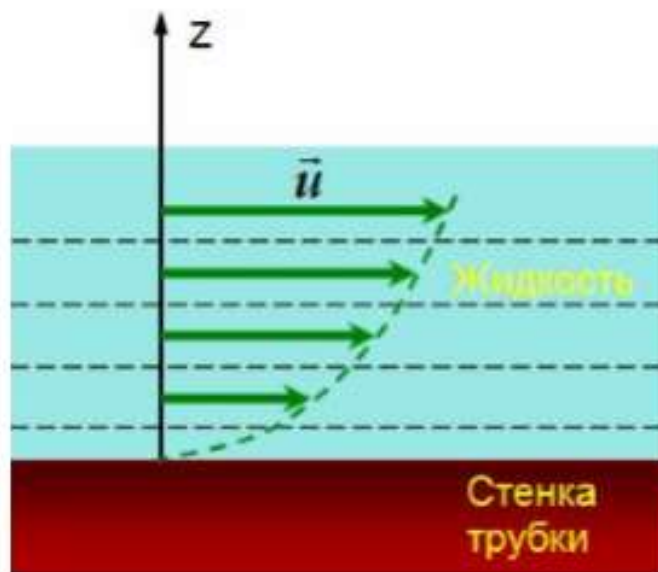


Рис. 1. Распределение скоростей слоев жидкости вблизи поверхности трубки.

Из формулы (1) очевиден физический смысл коэффициента вязкости η . Если положить градиент скорости $du/dz = 1$ и $S = 1$, то получим $|F| = \eta$. Таким образом, **коэффициент трения (вязкости)** численно равен силе трения, действующей на единицу площади поверхности соприкасающихся слоев при градиенте скорости $\frac{du}{dz}$, равном единице. В системе СИ коэффициент вязкости имеет размерность $[Н \cdot с/м^2]$ или $[Па \cdot с]$.

Вязкость жидкостей (газов) обуславливает сопротивление движению в них твердых тел. Стокс установил, что сила сопротивления пропорциональна коэффициенту динамической вязкости η , скорости движения тела v относительно жидкости и характерному размеру тела r . Коэффициент пропорциональности зависит от формы тела и для шара он равен 6π . Следовательно, сила сопротивления движению шарика в жидкости при небольших скоростях в соответствии с формулой Стокса равна:

$$F_{СТ} = 6\pi\eta vr. \quad (2)$$

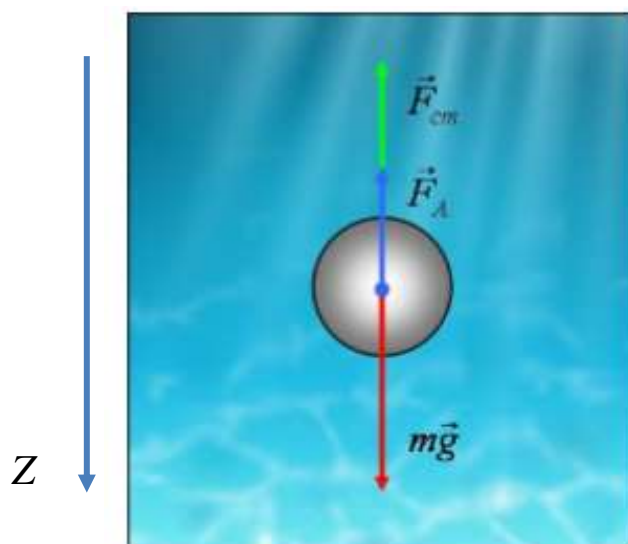


Рис. 1. Силы, действующие на шарик, движущийся в жидкости

На небольшой шарик, падающий вертикально в жидкости или газе, действуют три силы (рис. 2):

1. Сила тяжести, направленная вниз

$$F = mg = V\rho g = (4\pi/3)r^3\rho g, \quad (3)$$

где r – радиус шарика, ρ – его плотность;

2. Выталкивающая (Архимедова) сила, направленная вверх

$$F_A = (4\pi/3)r^3\rho_{жс}g, \quad (4)$$

где $\rho_{жс}$ – плотность жидкости или газа;

3. Сила сопротивления, направленная в сторону, противоположную движению, т. е. вверх

$$F_{ст} = 6\pi\eta r v. \quad (5)$$

Уравнение движения шарика в проекции на вертикальную ось Z имеет вид:

$$ma = mg - F_A - F_{ст} \quad (6)$$

Из трех действующих сил одна является переменной – это сила сопротивления (5), возрастающая пропорционально скорости. Поэтому с течением времени ускорение шарика уменьшается и

наступает такой момент, когда сумма сил F_A и $F_{Ст}$ уравновешивает силу тяжести. В этот момент ускорение тела станет равно нулю, и далее шарик будет двигаться в среде с постоянной скоростью. Тогда уравнение его движения примет вид:

$$mg = F_A + F_{Ст} \quad (7)$$

или

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho g = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{ж} g + 6\pi \eta r v, \quad (8)$$

откуда легко получить выражение для коэффициента вязкости

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{r^2 g}{v} (\rho - \rho_{ж}). \quad (9)$$

Таким образом, зная скорость установившегося движения v , плотность шарика ρ и жидкости $\rho_{ж}$, радиус шарика r и ускорение силы тяжести, можно вычислить значение коэффициента вязкости жидкости η .

При выводе формулы Стокса (9) предполагалось, что обтекание шарика жидкостью носит ламинарный характер. Как известно, характер обтекания определяется значением числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{vr\rho_{ж}}{\eta}.$$

Обтекание является ламинарным лишь при небольшом значении Re , порядка 1000. При более высоких значениях числа Рейнольдса возможен переход к турбулентному течению.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для измерений используется стеклянный цилиндрический сосуд, наполненный глицерином и имеющий двойные стенки, между которыми циркулирует вода из термостата. На стенках сосуда устанавливаются две метки на некотором расстоянии L друг от друга. Верхняя метка должна располагаться ниже уровня жидкости с таким расчетом, чтобы скорость шарика к моменту прохождения этой метки успела установиться. Измеряя расстояние между метками линейкой, а время падения секундомером, определяют скорость шарика v .

Радиусы шариков измеряются с помощью измерительного микроскопа, снабженного окулярной шкалой, цена деления которой 0,05 мм. Для каждого шарика рекомендуется измерить несколько различных диаметров и вычислить среднее значение. Такое усреднение целесообразно, поскольку в работе используются шарики, форма которых может несколько отличаться от сферической. Плотность шариков определяется из таблиц.

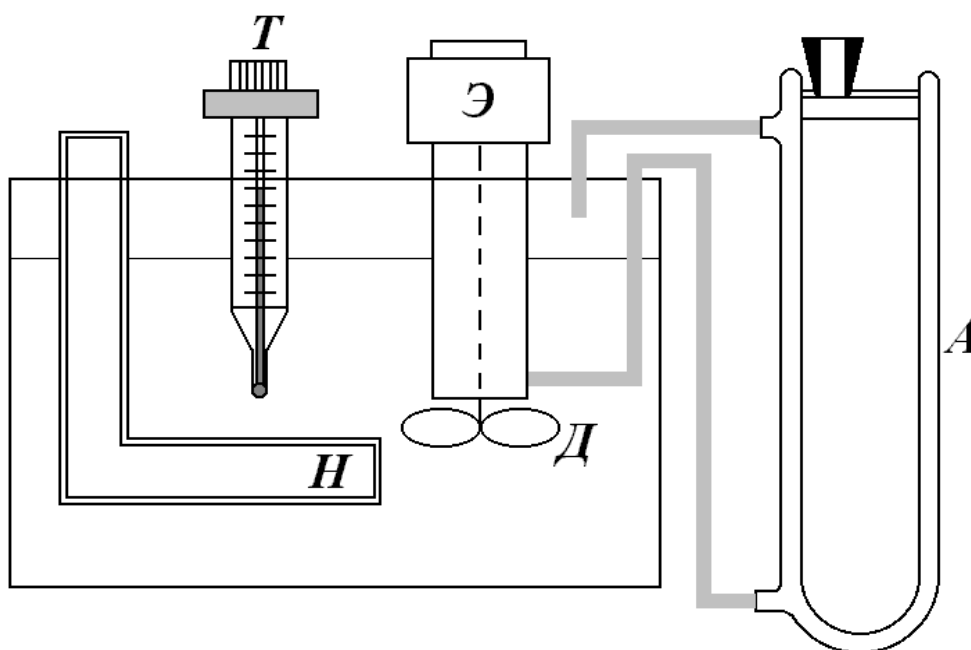


Рис. 3. Схема установки для определения коэффициента вязкости жидкости по методу Стокса.

А – сосуд с глицерином; T_1 – контактный термометр; T_2 – контрольный термометр; Н – нагреватель; Д – насос – мешалка; Э – электродвигатель.

Общий вид прибора для измерения коэффициента вязкости по методу Стокса показан на рис. 3.

ВЫПОЛНЕНИЕ ОПЫТА

1. Отберите 3–5 шариков. Измерьте их радиус. Для этого шарик кладут на предметное стекло и вместе с ним помещают на столик микроскопа. Диаметр шарика совмещают со шкалой и отсчитывают число делений, между которыми уместается шарик. Диаметр измеряется в 3–5 направлениях.

2. Шарик опускают в цилиндр, как можно ближе к центру. Глаз наблюдателя должен быть при этом уже установлен против верхней метки. В момент, когда шарик достигнет этой метки, пускают в ход секундомер. Затем глаз перемещают к нижней метке и в момент прохождения мимо нее шарика останавливают секундомер. Измерения проводятся не менее чем для трех шариков.
3. Измерьте расстояние между метками на цилиндре.
4. Рассчитайте скорость движения шариков.
5. Плотность исследуемой жидкости берется из графика, помещенного на стенде. Так как плотность и коэффициент вязкости меняются с изменением температуры, необходимо записать показания термометра в помещении.
6. Плотность шарика берется из таблицы.
7. Все данные занесите в таблицу.
8. Рассчитайте коэффициент вязкости жидкости по формуле (9).
9. Определите абсолютную и относительную погрешности измерения.

Таблица результатов измерений и расчетов

№ п/п	r, м	ρ , кг/м ³	$\rho_{ж}$, кг/м ³	L, м	t, с	v, м/с	η , кг/м·с	$\Delta\eta$, кг/м·с	ε , %

Контрольные вопросы

1. Объясните причину возникновения внутреннего трения между двумя слоями жидкости или газа, движущимися с различными скоростями. С переносом какой физической величины связано внутреннее трение?
2. Запишите формулу для силы внутреннего трения между слоями жидкости или газа. Объясните смысл входящих в нее величин. Как зависит сила трения от скоростей слоев?
3. В чем состоит физический смысл коэффициента вязкости?
4. Как зависит коэффициент вязкости жидкости и газа от температуры?
5. Какие силы действуют на шарик, движущийся в жидкости? Запишите уравнение движения шарика в жидкости и получите формулу расчета вязкости.

6. Зависят ли результаты измерений коэффициента вязкости от материала шарика, плотности шарика и плотности жидкости?
7. Будет ли зависеть результат измерений коэффициента вязкости, если шарик бросить в жидкость со скоростью v_0 , отличной от нуля?
8. Почему отсчет времени падения шарика нельзя начинать от момента начала его движения в жидкости?
9. Что такое ламинарное и турбулентное течение жидкости? Какой смысл имеет число Рейнольдса? Какова размерность числа Рейнольдса?
10. Приведите примеры других явлений переноса (помимо вязкости).

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Детлаф А. А. Курс физики [Текст]: учебное пособие / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – 7-е изд., стер. – М.: Академия, 2008. – 720 с.
2. Фриш, С.Э. Курс общей физики. В 3-х тт. Т.1. Физические основы механики. Молекулярная физика. Колебания и волны. [Электронный ресурс] : учебник / С.Э. Фриш, А.В. Тиморева. — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2008. — 471 с. — Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=416 — Дата обращения 10.09.2016 г.
3. Савельев, И.В. Курс общей физики. В 3 т. Том 1. Механика. Молекулярная физика [Электронный ресурс] : учебное пособие. — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2016. — 436 с. — Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=71760 — Дата обращения 10.09.2016 г.