

Работа 1.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ ТЕЛА И ПЛОТНОСТИ ВЕЩЕСТВА

Оборудование: технические весы, разновесы, взвешиваемые тела, пикнометр, исследуемая жидкость, стакан, подставка.

Введение

Масса является основной динамической характеристикой тела, количественной мерой его инертности. *Инертность* - присущее каждому телу свойство, проявляющееся в способности приобретать большее или меньшее ускорение под действием данной силы. За единицу массы принимают массу определенного эталонного тела. Единица массы, называемая *килограммом* (кг), входит в число семи основных единиц СИ.

Силой тяжести называют равнодействующую *силы тяготения* F_T и *центробежной силы инерции* $F_{ин}$, обусловленной суточным вращением Земли (рис. 1.13):

$$\vec{P}_\phi = \vec{F}_T + \vec{F}_{ин},$$

где $P_\phi = mg$ - сила тяжести тела на широте ϕ ; $F_{ин} = m\omega^2 R_3 \cos\phi$; R_3 - радиус Земли, ω - ее угловая скорость.

Сила тяжести зависит от географической широты и от высоты над уровнем моря. Изменение ее вызвано также сплюснутостью Земли у полюсов. Полярный радиус меньше экваториального приблизительно на 21 км. Однако эта разница расстояний от поверхности Земли до ее центра отражается на изменении силы тяжести незначительно.

Как показывают расчеты, максимальное значение центробежной силы инерции суточного вращения Земли составляет всего лишь 1/300 от силы тяготения, поэтому при решении многих практических вопросов силу тяжести принимают равной силе тяготения.

тяготения.

Направление силы тяжести определяется направлением отвеса. Оно не совпадает (кроме полюсов и точек на экваторе) с направлением к центру Земли по радиусу. Максимальная величина угла α между $\vec{F}_T$ и $\vec{P}_\phi$ (рис. 1.13), равная 0,0018 рад, или 6', будет на широте 45° .

Сила $\vec{G}$, с которой тело действует на подвес или опору, называется *весом тела*. Она равна силе тяжести лишь в том случае, если тело и опора (или подвес) неподвижны относительно Земли. Следует помнить, что сила тяжести и вес приложены к разным телам: $\vec{P}$ - к самому телу, $\vec{G}$ - к подвесу или опоре, которые ограничивают свободное движение тела в поле сил земного тяготения. По третьему закону Ньютона вес численно равен силе, с которой опора действует на тело, т.е. *реакции опоры*, поэтому вес можно находить по реакции опоры.

Вес тела, движущегося с ускорением $\vec{a}$,

$$\vec{G} = m(\vec{g} - \vec{a}).$$

Так, в ракете, которая поднимается с ускорением, космонавт испытывает перегрузки, а в лифте, который ускоренно опускается, вес тела уменьшается. Если тело движется вниз с ускорением $\vec{a} = \vec{g}$, наступает состояние невесомости.

Вес тела как сила, действующая на подвес или опору вследствие притяжения тела к Земле, определяется с помощью пружинных весов (динамометра). Отметим, что сопоставить веса нескольких тел можно лишь тогда, когда они определены при одинаковых условиях и в одном и том же месте. В подобных же случаях с помощью динамометра сравниваются и массы тел, так как веса разных тел при этом будут пропорциональны их массам: $G_1 / G_2 = m_1 / m_2$.

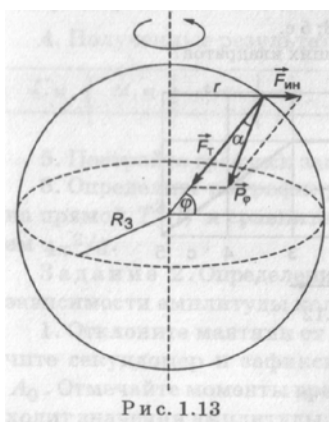


Рис. 1.13

Пропорциональность весов разных тел, находящихся в одинаковых условиях и в одном и том же месте, их массам позволяет сравнивать массы тел с помощью рычажных весов. Из условия равновесия равноплечего рычага (рис. 1.14) следует, что силы, действующие на него, равны между собой, т.е. вес тела равен весу подвешенных гирь: $G_1 = G_2$.

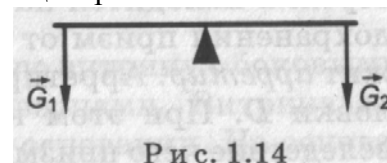


Рис. 1.14

Из пропорциональности весов и масс тел получаем, что $m_1 = m_2$. Имея набор гирь-эталонов, можно измерить массу любого тела.

Для взвешивания тел пользуются различного рода весами: техническими, аналитическими и др. Для точного взвешивания обычно применяются аналитические весы. Простейшие из них изображены на рис. 1.15.

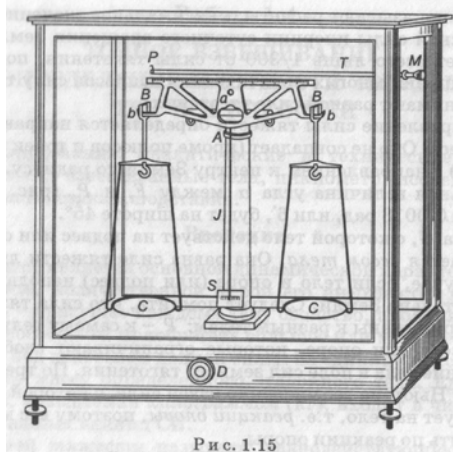


Рис. 1.15

Весы состоят из равноплечего рычага BB , называемого *коромыслом*. Опорой его служит ребро стальной закаленной призмы a , находящейся в середине коромысла и опирающейся на агатовую полированную пластинку, укрепленную сверху колонки A . На концах коромысла находятся призмы b для подвешивания чашек C . Ребра средних и крайних призм параллельны и лежат в одной плоскости. К середине коромысла прикреплена стрелка J , конец которой движется перед шкалой S , находящейся у основания колонки. При горизонтальном положении коромысла стрелка находится на среднем делении шкалы. Для предохранения призм от износа в нерабочем состоянии служит *арретир*. Арретирование производится поворотом головки D . При этом коромысло и чашки поднимаются, вследствие чего призмы освобождаются от давления.

При взвешивании используются специальные гири с обозначенной на них массой. Чтобы не пользоваться гирями меньше 10 мг, применяют *рейтер* P . Он представляет собой тонкую проволоку, согнутую в виде крючка с ушками. Поворотом головки M стержня T рейтер захватывается рычажком на стержне и путем перемещения параллельно коромыслу устанавливается в нужное положение. Если коромысло разделено на 10 равных частей, то установка рейтера массой 10 мг на первое, второе и последующие деления (считая от середины), равносильно помещению на чашку весов грузов массой 1, 2, 3 мг и т.д. Аналитические весы защищены от пыли и воздушных потоков стеклянным шкафом.

Более совершенную конструкцию имеют аналитические весы типа АДВ-200-М, изображенные на рис. 1.16. Они предназначены главным образом для точных взвешиваний

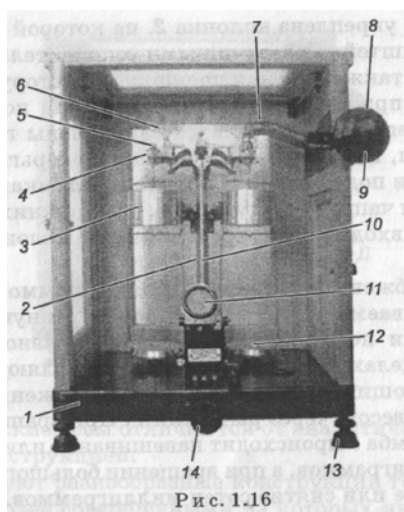


Рис. 1.16

при проведении анализов в научно-исследовательских институтах и заводских лабораториях. Кроме того, их можно использовать для обычного взвешивания в пределах до 200 г. Весы заключены в металлическую витрину с боковыми выдвигающимися стеклянными дверцами. Витрина закреплена на металлическом литом основании. На основании весов / укреплен колонка 2, на которой расположены два кронштейна с воздушными успокоителями - демпферами 3, а также опорная подушка, на которую опирается средняя призма коромысла 6 весов. На концах коромысла в специальных седлах 4 закреплены грузоприемные призмы, на которые навешиваются серьги 5 с грузоподъемными подушками. На верхних крючках серег подвешиваются чашки 12 с дужками, а на нижних - стаканы демпферов, входящие в укрепленные на колонке корпуса демпферов.

Весы снабжены встроенными миллиграммовыми гирями, навешиваемыми на планку, скрепленную с правой серьгой. Они позволяют производить уравнивание весов в пределах $10 \div 1210$ мг. Гири управляются с помощью вращающихся лимбов 8 и 9, расположенных справа от витрины весов, через рычажки 7. При вращении центрального лимба 9 происходит навешивание или снятие десятков миллиграммов, а при вращении большого лимба 8 - навешивание или снятие сотен миллиграммов. Вращение лимбов происходит независимо друг от друга.

На коромысле 6 весов укреплен стрелка 10, на нижнем конце которой расположена микрошкала с отсчетом от 0 до 10 мг в обе стороны. С помощью оптического устройства, состоящего из подсветки, объектива и отражающих зеркал, микрошкала проецируется на экран 11, расположенный перед колонкой весов.

Под основанием весов смонтировано арретирующее устройство, которое приводится в действие с помощью маховичка 14. Осветительная система расположена позади весов, снаружи витрины. Весы имеют одну заднюю нерегулируемую ножку и две регулируемые боковые ножки 13, с помощью которых устанавливаются по уровню, укрепленному в основании весов.

Весы типа АДВ-200-М имеют следующие технические характеристики: максимальная нагрузка 200 г; цена деления оптической шкалы 0,1 мг/дел.; диапазон измерения по оптической шкале ± 10 мг; взвешивание с помощью механизма навешивания миллиграммового разновеса можно производить от 10 до 990 мг; время успокоения не более 40 с; погрешность 100 делений оптической шкалы - не более $\pm 0,3$ мг; погрешность кольцевых миллиграммовых гирь, встроенных в весы и управляемых гиревым механизмом, - в пределах $\pm 0,05$ мг (каждая гиря).

Нулевой точкой или *точкой равновесия весов* называется то деление шкалы, на котором при отсутствии трения останавливается стрелка, когда коромысло перестает колебаться.

Чувствительность весов — это отношение числа n делений шкалы, на которое смещается стрелка, к массе дополнительного перегруза Δm , вызвавшего это смещение:

$$a = n / \Delta m \text{ (дел/мг)}.$$

Величину, обратную чувствительности, называют *ценой деления*:

$$c = \Delta m / n \text{ (мг/дел)}.$$

При взвешивании необходимо соблюдать следующие правила:

1. Нельзя нагружать весы больше предельной нагрузки, которая обычно указана на самих весах.
2. Нельзя класть на чашки и снимать с них гири и грузы, а также переставлять рейтер до тех пор, пока весы не арретированы.
3. Грузы следует накладывать на чашки так, чтобы общий центр тяжести грузов приходился по возможности на середину весов.
4. Нельзя брать гири руками; для этого служит пинцет, которым маленькие гири плоской формы (доли грамма) берутся за загнутые уголки. Сняв гири с весов, их кладут в специальный ящик на определенные места.
5. Не следует полностью освобождать коромысло, пока чашки весов еще недостаточно уравновешены. Его освобождают настолько, чтобы можно было определить, которая из чашек легче, замечая отклонение стрелки. Затем коромысло арретируют и прибавляют или убавляют гири.
6. При малой разнице между массами взвешиваемого тела и гирь коромысло начинает колебаться. При этом дверцы весов должны быть закрыты.
7. Нельзя надолго оставлять грузы на чашках. Когда взвешивание окончено, следует весы арретировать, грузы снять, дверцы закрыть.

Взвешивание

При взвешивании на левую чашку весов кладут взвешиваемое тело, на правую — гири, приблизительно соответствующие массе тела. Осторожно освободив арретир, наблюдают за отклонением стрелки весов. Если она резко отклоняется влево или вправо, то, арретировав

весы, подбирают гири до тех пор, пока весы не придут в приблизительное равновесие. С помощью гирь взвешивание производят с точностью до 10 мг, далее (до 1 мг) - рейтером, передвигая его по коромыслу до уравнивания весов. При этом масса m тела равна массе m_2 гирь плюс показания рейтера m_p : $m = m_2 + m_p$.

Поправка на кажущуюся потерю веса в воздухе

Истинное значение массы тела в вакууме с учетом поправки на потери в воздухе находят по формулам: $m = m_{\Gamma} \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho_{\Gamma}} + \frac{\rho_B}{\rho} \right)$, где ρ - плотность вещества взвешиваемого тела.

Гири обычно изготавливают из латуни, их плотность $\rho_{\Gamma} = 8,4 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, плотность воздуха при нормальных условиях $\rho_B = 1,293 \text{ кг/м}^3$. Разность между кажущимся и истинным значениями не превышает 0,2%, поэтому на практике часто ограничиваются определением массы тела непосредственно взвешиванием, не приводя ее к вакууму.

Определение плотности твердых тел методом гидростатического взвешивания

Для определения плотности тела необходимо измерить его массу и объем: $\rho = m/V$. Массу можно определить с большой точностью непосредственно на весах (конечно, только в том случае, если введена соответствующая поправка на кажущуюся потерю веса тела в воздухе). Этого нельзя сказать об объеме, особенно для тел неправильной формы. Поэтому для точного нахождения плотности следует применять методы, которые позволяют определить объем тела, не прибегая к нахождению его размеров. Воспользуемся методом, основанным на учете выталкивающей силы Архимеда, действующей на тело, погруженное в жидкость.

1. Взвесим тело в воздухе, уравновесив его гирями массой m_1 . Условие равновесия с учетом выталкивающих сил имеет вид

$$\rho V g - \rho_B V g = m_1 g - \rho_B V_1 g.$$

Выразив объем гирь через их массу и плотность ($V_1 = m_1 / \rho_{\Gamma}$) и сделав соответствующие преобразования, получим: $(\rho - \rho_B)V = m_1 \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho_{\Gamma}} \right)$. (1)

2. Взвесим тело в жидкости, уравновесив его гирями массой $m_2 = \rho_{\Gamma} V_2$, находящимися в воздухе. Условие равновесия при этом имеет вид:

$$\rho V g - \rho_{\text{ж}} V g = m_2 g - \rho_B V_2 g.$$

или

$$(\rho - \rho_{\text{ж}})V = m_2 \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho_{\Gamma}} \right). \quad (2)$$

Разделив выражение (1) на (2), получим: $\frac{\rho - \rho_B}{\rho - \rho_{\text{ж}}} = \frac{m_1}{m_2}$.

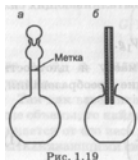
Отсюда
$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2} (\rho_{\text{ж}} - \rho_B) + \rho_B.$$

Если плотность тела $\rho \gg \rho_B$, то формула упрощается

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2} (\rho_{\text{ж}} - \rho_B). \quad (3)$$

Определение плотности жидкости с помощью пикнометра

Пикнометр - стеклянный сосуд специальной формы и определенной вместимости, применяемый для точных измерений плотности жидкостей и твердых тел. Наиболее распространены пикнометры с меткой и глухой притертой пробкой (рис. 1.19, а), а также с капилляром в пробке (рис. 1.19, б).



Так как при последовательном наполнении пикнометра объемы исследуемых жидкостей одинаковы, то

дуемой и эталонной жидкостей одинаковы, а массу жидкостей можно установить с большей точностью на весах, то искомую плотность легко найти путем трех последовательных взвешиваний.

1. Уравновесим пустой пикнометр гирями массой m_1 . С учетом выталкивающих сил условие равновесия имеет вид

$$m_0 g - \rho_B V_0 g = m_1 g - \rho_B V_1 g.$$

$$\text{или } m_0 - \rho_B V_0 = m_1 \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho_\Gamma}\right), \quad (4)$$

где m_0 , V_0 - масса и объем пикнометра; m_1 , V_1 - масса и объем гирь; ρ_B , ρ_Γ - плотности воздуха и гирь.

2. Наполним пикнометр до метки эталонной жидкостью (например, дистиллированной водой) и взвесим. Условие равновесия: $m_0 - \rho_B V_0 + \rho_\Xi V - \rho_B V = m_2 \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho_\Gamma}\right), \quad (5)$

где ρ_Ξ - плотность эталонной жидкости; V - объем жидкости, m_2 - масса гирь.

3. Наполним пикнометр до метки исследуемой жидкостью и взвесим его. Условие равновесия:

$$m_0 - \rho_B V_0 + \rho V - \rho_B V = m_3 \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho_\Gamma}\right). \quad (6)$$

Произведя вычитание равенства (4) из выражений (5) и (6) и разделим полученные результаты, будем иметь: $\frac{\rho - \rho_B}{\rho_\Xi - \rho_B} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1}$, откуда

$$\rho = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} (\rho_\Xi - \rho_B) + \rho_B.$$

Если плотность исследуемой жидкости $\rho \gg \rho_B$, то формула упрощается:

$$\rho = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} (\rho_\Xi - \rho_B). \quad (7)$$

Порядок выполнения работы

Задание 1. Определение массы тела

1. Определите массу тела с помощью технических весов: $m = m_\Gamma + m_P$.

2. Определите истинное значение массы тела в вакууме с учетом поправки на потери в

воздухе: $m = m_\Gamma \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho_\Gamma} + \frac{\rho_B}{\rho}\right),$

3. Определите погрешность при определении массы тела. Относительная погрешность равна отношению суммарной погрешности всех гирь и разновесов (определяется по таблице)

к их суммарной массе: $\delta = \frac{\sum \Delta m_i}{\sum m_i}.$

Задание 2. Определение плотности твердого тела методом гидростатического взвешивания.

1. Взвесьте исследуемое тело в воздухе, подвесив его на проволочке к сережке весов. Определите массу тела m_1 .

2. Взвесьте исследуемое тело в дистиллированной воде (пользуясь подставкой). Определите массу тела m_2 .

3. Плотность рассчитайте по формуле (3).

4. Оцените предельную погрешность измерения плотности по формуле

$$\Delta\rho = \langle\rho\rangle \left(\frac{\Delta m_1}{m_1} + \frac{\Delta m_1 + \Delta m_2}{m_1 - m_2} \right).$$

Задание 3. Определение плотности жидкости с помощью пикнометра.

1. Произведите на аналитических весах взвешивание пустого пикнометра для определения его массы m_1 .

2. Произведите на аналитических весах взвешивание пикнометра, заполненного эталонной жидкостью (дистиллированной водой), для определения массы m_2 .

3. Произведите на аналитических весах взвешивание пикнометра, заполненного исследуемой жидкостью, для определения массы m_3 .

4. Плотность исследуемой жидкости определите по формуле (7).

5. Оцените предельную погрешность нахождения плотности по формуле

$$\Delta\rho = \langle\rho\rangle \left(\frac{\Delta m_3 + \Delta m_1}{m_3 - m_1} + \frac{\Delta m_2 + \Delta m_1}{m_2 - m_1} \right).$$

Задания для УИР

1. Произведите взвешивание тела методами тарирования и двойного взвешивания. Сравните точность измерений.

2. Выведите формулу и рассчитайте плотность твердого тела в виде маленьких кусочков (известкового шпата) с помощью пикнометра.

3. Предложите методы и определите массу и плотность тела неправильной формы, пользуясь цилиндрическим сосудом с водой и линейкой. Рассмотрите случаи, когда плотность тела больше и меньше плотности воды.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение массы тела. В каких единицах она измеряется? Как устанавливается эталон массы? Какими опытами подтверждается аддитивность массы?

2. Что понимают под инертностью тела? Приведите примеры, иллюстрирующие проявление инертности.

3. Что называют силой тяжести? К чему она приложена и как направлена? Как определяется сила тяжести?

4. Почему сила тяжести одного и того же тела различна в разных местах Земли?

5. На каком основании силу тяжести тела и силу притяжения этого тела Землей можно приближенно считать равными друг другу? В каком случае это равенство выполняется точно?

6. Что называют весом тела? К чему приложена эта сила?

7. В чем отличие силы тяжести от веса одного и того же тела?

8. От чего зависит вес тела? Как изменяется вес тела в лифте, который движется равноускоренно (равнозамедленно) вверх (вниз)? Объясните возникновение состояния невесомости. Приведите примеры.

9. Как измеряются вес и масса тела?

10. Зависит ли плотность тела от температуры?

11. Будет ли выполнено условие равновесия весов, если они движутся равноускоренно? равномерно?

12. Можно ли определить массу тела на рычажных весах, которые находятся в космическом корабле, движущемся по круговой орбите?

13. Что называют нулевой точкой? ценой деления? чувствительностью весов? Как определяются эти величины?

14. Для чего вес тела приводят к вакууму? Чем обусловлена необходимость выполнения этой операции? В каких случаях этого делать не надо?

15. Как оценить погрешность определения массы? Какие существуют методы повышения точности взвешивания?