

**Городская конференция обучающихся муниципальных
образовательных учреждений «Шаги в науку»**

Образовательная область «Физика»

***Определение плотности
воздуха***

Омск, 2011

Введение

Великий русский ученый Д.И. Менделеев говорил: «Наука начинается тогда, когда начинают измерять» (1, с. 8). Поэтому важно уметь правильно измерять физические величины и верно оценивать результаты измерений. При изучении физики в школе учатся измерять такую физическую величину, как плотность. «Плотность есть физическая величина, равная отношению массы тела к его объему:

$$\rho = m/V \text{ (2, с. 44).}$$

Но, как правило, измеряют или плотность твердых тел, или плотность жидкостей. Плотность же газов не измеряют. По этой причине **актуально** рассмотреть способы измерения плотности газа. **Целью** данной работы является разработка способа измерения плотности воздуха. В работе ставились и решались следующие **задачи**:

- Изучить известные способы измерения плотности воздуха;
- Дать теоретическое обоснование способа измерения плотности воздуха на основе газовых законов и понятия гидростатического давления;
- Изготовить установку и получить экспериментальные результаты.

Объектом работы является методы измерения физических величин. **Предмет работы** - «гидростатический» способ измерения плотности воздуха.

Теоретическая значимость выполненной работы заключается в том, что анализ зависимости давления газа от его объема и применения формулы для расчета давления, производимого столбом газа, позволили вывести формулу для определения плотности воздуха. **Практическая значимость** работы заключается в том, что предложена простая экспериментальная установка, с помощью которой можно не только измерять плотность воздуха, но и демонстрировать изменения атмосферного давления с высотой.

Основная часть

§ 1. Определение плотности воздуха взвешиванием

Для измерения плотности воздуха стеклянную шарообразную колбу плотно закроем пробкой, в которую вставлена стеклянная трубка с краном. Используя весы, определим массу колбы вместе с пробкой и стеклянной трубкой (3, с.78). В одном из опытов она оказалась равной:

$$m_1 = (204,5 \pm 0,1) \text{ г.}$$

После этого колбу соединим с насосом и откачаем из колбы воздух (рис. 1, а). Кран перекроем, отсоединим колбу от шланга и повторно взвесим ее. Масса колбы (после откачивания воздуха) оказалась равной:

$$m_2 = (203,3 \pm 0,1) \text{ г.}$$

Значит, масса выкачанного воздуха m равна:

$$m = m_1 - m_2.$$

Для того чтобы выяснить, какой объем занимал тот воздух, который был выкачан из колбы, возьмем сосуд с водой и расположим колбу так, чтобы стеклянная трубка находилась в воде (рис. 1, б). Откроем кран; под действием атмосферного давления вода войдет в колбу. До каких пор вода будет поступать в колбу? До тех пор, пока оставшийся в колбе воздух не будет сжат до атмосферного давления. Таким образом, вода заполнит в колбе именно тот объем, что ранее занимал воздух, выкачанный из колбы. Перелив воду из колбы в мензурку, определим этот объем. Так в опыте объем V оказался равен:

$$V = (950 \pm 50) \text{ см}^3.$$

Зная массу выкачанного воздуха и объем, который он занимал, легко определить плотность воздуха:

$$\rho = m/V$$

или

$$\rho = (m_1 - m_2)/V.$$

Плотность воздуха получилась равной

$$\rho = 0,0013 \text{ г/см}^3,$$

$$\rho = 1,3 \text{ кг/м}^3.$$

Относительная погрешность измерения плотности ε_ρ равна сумме относительных погрешностей измерения массы ε_m и объема ε_V .

$$\varepsilon_\rho = \varepsilon_m + \varepsilon_V,$$

$$\varepsilon_\rho = \frac{0,2}{1,2} + \frac{50}{950},$$

$$\varepsilon_\rho = 0,22.$$

С другой стороны:

$$\varepsilon_\rho = \frac{\Delta\rho}{\rho}.$$

Тогда:

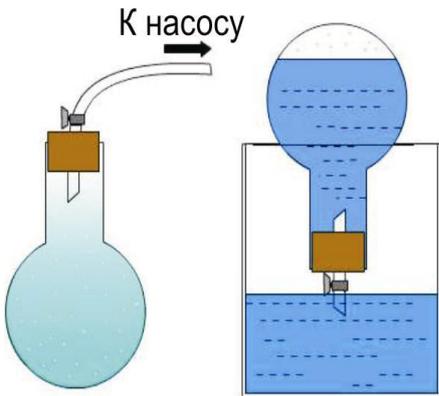
$$\Delta\rho = \varepsilon_\rho \cdot \rho.$$

$$\Delta\rho = 0,3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Окончательно имеем:

$$\rho = (1,3 \pm 0,3) \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Как видно, полученный результат согласуется со справочными данными (4, с.65, табл. 11).



а б
Рис. 1

§ 2. Наблюдение зависимости атмосферного давления от высоты

Рассмотрим газ в баллоне, находящийся при постоянной температуре. «Молекулы газа совершают непрерывные и беспорядочные тепловые движения. При этом молекулы, достигая стенки баллона, ударяются о стенку и действуют на неё с некоторой силой. Удар одной молекулы ничтожно слаб и никакой прибор не измерит силу этого удара. Но молекул газа огромное количество. И общее действие всех молекул, ударяющихся о стенку баллона, должно быть вполне ощутимо... Это действие можно охарактеризовать величиной давления. Давление газа p может быть рассчитано по формуле, определяющей давление:

$$p = F/s,$$

где F - сила, с которой молекулы газа действуют на стенку баллона, а s - площадь стенки....

Однако причина возникновения давления газа иная, чем в случае твердых тел. Твердое тело производит давление на опору, потому что притягивается к земле, на тело действует сила тяжести. Газ же производит давление благодаря ударам молекул газа об стенки баллона при беспорядочном тепловом движении молекул» (1, с. 171-173).

Чем больше плотность газа ρ , тем больше молекул находится в баллоне. Значит, число ударов молекул каждую секунду на единицу площади будет больше; по этой причине и давление газа p выше:

$$p \sim \rho.$$

Плотность газа определяется его массой m и объемом баллона V :

$$\rho = m/V.$$

Следовательно,

$$p \sim 1/V.$$

Во сколько раз увеличивается объем газа, во столько раз уменьшается его давление. Таким образом

$$pV = const.$$

Если температура газа неизменна, то произведение давления газа на его объем есть величина постоянная для данной массы газа.

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \quad (2.1)$$

Это утверждение называется в физике законом Бойля и Мариотта (5, стр. 114).

Применим закон Бойля-Мариотта для вывода формулы, позволяющей определить плотность воздуха. Пусть воздух находится в сосуде. Сосуд закрыт герметично крышкой, через которую выведены две трубки. Одна из трубок снабжена краном. В другой трубке находится капелька жидкости, которая может смещаться по трубке при изменении давления воздуха в сосуде. Сдвиг капельки жидкости фиксируется с помощью шкалы с миллиметровыми делениями.

Пусть первоначально давление воздуха в сосуде равно атмосферному, а объем воздуха в сосуде составляет V_0 :

$$p_1 = p_{\text{атм}}, \quad (2.2)$$

$$V_1 = V_0. \quad (2.3)$$

Закроем кран и поднимем сосуд на высоту H . При этом атмосферное давление уменьшится на величину давления, создаваемого столбом воздуха, высотой H :

$$p_{\text{столб}} = \rho_{\text{вх}} g H, \quad (2.4)$$

где $p_{\text{столб}}$ - давление столба воздуха,

$\rho_{\text{вх}}$ - плотность воздуха

$g = 9,81 \text{ Н/кг}$

Если внешнее давление уменьшилось, то при подъеме воздух в сосуде расширится так, чтобы его давление p_2 вновь стало равно внешнему:

$$p_2 = p_{\text{атм}} - p_{\text{столб}} \quad (2.5)$$

Пусть площадь поперечного сечения трубки с капелькой составляет s . Если при расширении воздуха капелька жидкости сместилась на x , то можно определить - на сколько увеличился объем воздуха в сосуде:

$$V_{\text{доб}} = sx, \quad (2.6)$$

где $V_{\text{доб}}$ – увеличение объема воздуха в сосуде.

Таким образом, после расширения воздух занимает объем V_2 , равный:

$$V_2 = V_0 + V_{\text{доб}}. \quad (2.7)$$

Используя соотношения (2.2), (2.3), (2.5), (2.7) и формулу закона Бойля-Мариотта (2.1), получим:

$$\begin{aligned} p_{\text{атм}}V_0 &= (p_{\text{атм}} - p_{\text{столб}})(V_0 + V_{\text{доб}}). \\ p_{\text{атм}}V_0 &= p_{\text{атм}}V_0 - p_{\text{столб}}V_0 + p_{\text{атм}}V_{\text{доб}} - p_{\text{столб}}V_{\text{доб}}, \\ p_{\text{атм}}V_{\text{доб}} - p_{\text{столб}}V_0 - p_{\text{столб}}V_{\text{доб}} &= 0, \\ p_{\text{атм}}V_{\text{доб}} - p_{\text{столб}}(V_0 + V_{\text{доб}}) &= 0, \\ p_{\text{столб}}(V_0 + V_{\text{доб}}) &= p_{\text{атм}}V_{\text{доб}}. \end{aligned}$$

Давление, производимое столбом жидкости, определяется соотношением (2.4). Тогда последнее выражением запишется в виде:

$$\rho_{\text{вх}}gH(V_0 + V_{\text{доб}}) = p_{\text{атм}}V_{\text{доб}}.$$

Отсюда

$$\rho_{\text{вх}} = p_{\text{атм}}V_{\text{доб}}/gH(V_0 + V_{\text{доб}}). \quad (2.8)$$

Упростим формулу (2.8). Сравним объем сосуда V_0 и добавочный объем $V_{\text{доб}}$.

Ясно, что

$$V_{\text{доб}} \ll V_0.$$

Тогда в знаменателе формулы (2.8) слагаемым $V_{\text{доб}}$ можно пренебречь в сравнении со слагаемым V_0 :

$$\rho_{\text{вх}} = p_{\text{атм}}V_{\text{доб}}/gHV_0. \quad (2.9)$$

Величина добавочного объема $V_{\text{доб}}$ определяется соотношением (2.6). Тогда выражение (2.9) окончательно примет вид:

$$\rho_{\text{вх}} = p_{\text{атм}}sx/gHV_0. \quad (2.10)$$

Проанализируем данное выражение. Атмосферное давление $p_{\text{атм}}$ измеряется барометром-анероидом. Площадь поперечного сечения s трубки можно определить, измерив внутренний диаметр трубки. Коэффициент g известен. Высота подъема легко измеряется рулеткой. Объем V_0 несложно измерить, наполнив сосуд водой и определив затем объем воды мензуркой.

Однако попытки определения плотности воздуха с использованием формулы (2.10) не привели к успеху. Когда в опыте в качестве трубки с капелькой применяли гибкую тонкую пластиковую трубку от одноразовой медицинской «системы», то капелька жидкости в трубке не перемещалась даже при переходе с третьего на первый этаж. (При этом герметичность используемой установки была соблюдена.)

При использовании же стеклянной трубки с внутренним диаметром 2,50 мм (диаметр измерялся с помощью микрометра и клинышка, вводимого в трубку) смещение капельки жидкости происходило. Если трубку расположить горизонтально и ввести в нее термометрическую жидкость из



Рис. 2

пришедшего в негодность спиртового термометра, то при переходе с этажа на этаж (4,2 м) капля жидкости смещалась примерно на 2 см.

Полученные результаты, вероятно, можно объяснить влиянием смачивания на смещение капли жидкости и возникновением сил взаимодействия капли со стенками трубки, не учтенные нами.

Таким образом, при подобной конструкции установки ее можно использовать не для количественного определения плотности воздуха, а для качественного наблюдения зависимости атмосферного давления от высоты точки измерения (рис. 2).

Отметим, что впервые удачная попытка наблюдения изменения атмосферного давления с высотой была предпринята еще Б. Паскалем (более точно – группой наблюдателей по его указаниям). «Перье отметил на одной из трубок уровень находившееся в ней ртути и поручил наблюдать за ней... Сам же он, взяв вторую трубку, поднялся со своими помощниками на вершину горы, которая возвышалась над монастырским садом... Разница уровней ртути на вершине горы и в саду составила... 3 дюйма $1\frac{1}{2}$ линии» (6, с. 128 – 129).

§3. Прибор Д. И. Менделеева

Прибор, который фиксировал изменение атмосферного давления с высотой, впервые был изготовлен Д. И. Менделеевым и назван им дифференциальным барометром – высотомером (7). Д. И. Менделееву удалось добиться высочайшей точности определения изменений давления. Переставляя прибор с места на место в ходе экспериментов, ученый обратил внимание на то, что разность высот предметов, находящихся в лаборатории, легко могла быть определена по показаниям дифференциального барометра. «Высоты столов, окна и ступеней лестницы над полом были достаточны для ясных и правильных указаний времен давления, замечаемых на устроенном приборе. Это было первое нивелирование, произведенное моим дифференциальным барометром. Оно указало, что прибор этот можно применить для практической цели», - писал ученый.

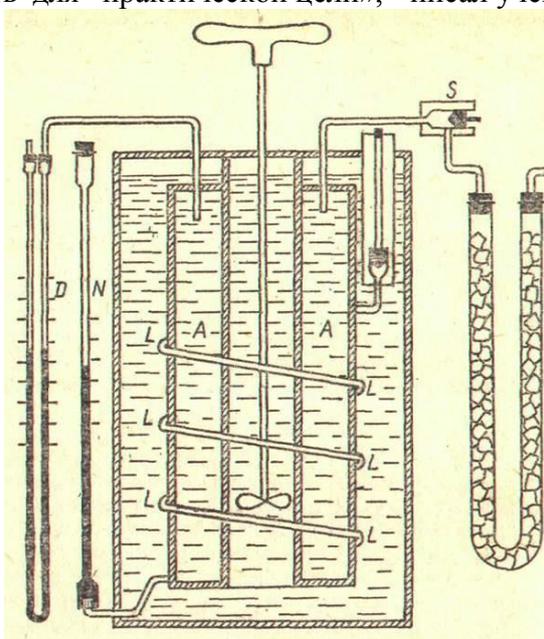


Рис. 3

Прибор устроен таким образом (см. рис. 3). Герметически закрытый цилиндр кольцеобразного сечения *A*, имеющий два вывода через тонкие металлические трубки, помещен в другой, цилиндрический сосуд, наполненный водой (водяную ванну). Одна из трубок (на рисунке правая) снабжена краном *S*, при помощи которого воздух в сосуде может соединяться с атмосферой (атмосферный воздух предварительно осушается в трубке

с хлористым кальцием). Другая трубка (левая на рисунке) герметически соединена манометрической трубкой O , до половины заполненной нефтяным маслом. Принцип действия прибора Менделеева прост: периодически открывая кран S , можно легко определить изменение атмосферного давления по манометру O . В этот прибор включался и весьма оригинальной конструкции дифференциальный термометр. Последний представил собой тонкую медную трубку L , охватывающую сосуд с воздухом виде змеевика и соединенную со стеклянной трубкой (в ней также находилось нефтяное масло), которая помещалась возле шкалы на передней панели прибора. Чувствительность дифференциального термометра Менделеева была необычайно высока - до тысячных долей градуса.

Д. И. Менделеев видел немало областей применения дифференциального барометра. В первую очередь это могло быть барометрическое нивелирование — определение разности высот различных точек земной поверхности. Прибор мог быть успешно применен, писал Менделеев, при осушении местности, т. е. при определении направления и величины скатов на значительных расстояниях, при проектировании направления железных дорог и других путей сообщения... при подземных горных и инженерных работах... при геологических исследованиях». Особенно выгодно, указывал ученый, применение дифференциального барометра в лесистых, заболоченных местностях, а также там, где обычному нивелированию мешают скалы или здания.

§ 4. Гидростатический способ определения плотности воздуха

Подсоединим к сосуду жидкостный манометр. Откроем кран и соединим сосуд с атмосферой. При этом давление в сосуде p_1 сравняется с атмосферным давлением $p_{\text{атм}}$:

$$p_1 = p_{\text{атм}}. \quad (3.1)$$

Закроем кран и опустим сосуд вниз на высоту H . Атмосферное давление увеличится и станет равным:

$$p_{\text{атм}} + \rho_{\text{вх}}gH.$$

Столбик жидкости в манометре сместится на h и будет создавать давление $p_{\text{ж}}$, равное:

$$p_{\text{ж}} = \rho_{\text{ж}}gh,$$

где $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости, которой заполнен манометр.

Воздух в сосуде при этом будет незначительно сжат, его давление станет равным p_2 .

Условие равновесия жидкости в манометре можно, очевидно, записать в виде:

$$p_{\text{атм}} + \rho_{\text{вх}}gH = p_2 + \rho_{\text{ж}}gh. \quad (3.2)$$

Допустим, что площадь поперечного сечения трубки манометра $0,25 \text{ см}^2$ (завышенное значение) и столбик жидкости сместился на высоту h порядка 2 см (завышенное значение). Тогда изменение объема воздуха в сосуде ΔV равно:

$$\Delta V = 0,25 \text{ см}^2 \cdot 2 \text{ см},$$

$$\Delta V = 0,5 \text{ см}^3.$$

Так как объем сосуда составляет 3250 см^3 , то объем воздуха в сосуде, а значит, и давление воздуха в сосуде изменились незначительно и

$$p_1 = p_2. \quad (3.3)$$

С учетом соотношений (3.1), (3.3) выражение (3.2) примет вид:

$$\rho_{\text{вх}}gH = \rho_{\text{ж}}gh.$$

Окончательно имеем:

$$\rho_{\text{вх}} = \rho_{\text{ж}}h/H.$$

При выполнении эксперимента манометр был заполнен касторовым маслом, имеющим плотность 960 кг/м^3 . Другие, менее плотные жидкости (бензин, керосин, ацетон), либо небезопасны, либо их плотности требуется определять дополнительно, так как в справочниках указан возможный диапазон плотностей.

В опыте были получены следующие результаты:

$$\begin{aligned}
H &= (650 \pm 5) \text{ см}, \\
h &= (8 \pm 1) \text{ мм}, \\
\rho_{\text{ex}} &= 1,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \\
\varepsilon_{\rho_{\text{ex}}} &= \varepsilon_{\rho_{\text{ж}}} + \varepsilon_H + \varepsilon_h, \\
\varepsilon_{\rho_{\text{ex}}} &= \frac{0,5}{960} + \frac{5}{650} + \frac{1}{8}, \\
\varepsilon_{\rho_{\text{ex}}} &= 0,13, \\
\Delta\rho_{\text{ex}} &= \varepsilon_{\rho_{\text{ex}}} \cdot \rho_{\text{ex}}, \\
\Delta\rho_{\text{ex}} &= 0,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \\
\rho_{\text{ex}} &= (1,2 \pm 0,2) \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.
\end{aligned}$$

Как видно, полученный результат находится в согласии с табличными данными.

Заключение

Выполнив данную работу, мы убедились, что имеется простой «гидростатический» способ определения плотности воздуха.

Разработанную нами установку можно успешно использовать на уроках физики в седьмом классе при демонстрации зависимости атмосферного давления от высоты. Также на данной установке легко продемонстрировать зависимость давления газа от его температуры при нагревании воздуха в сосуде.

Используя данную установку и определяя плотность воздуха, можно в дальнейшем изучить, как плотность воздуха зависит от его температуры. Теоретически данная зависимость следует из уравнения Клапейрона и Менделеева:

$$pV = (mRT)/M,$$

где p - давление газа,

V - объем газа,

m - масса газа,

M - молярная масса газа,

R - 8,31 Дж/(мольК),

T - абсолютная температура (5, с.110).

Масса газа m определяется его плотностью:

$$m = \rho V.$$

Тогда

$$pV = (\rho VRT)/M.$$

Отсюда

$$\rho = pM/(RT).$$

Так как молярная масса воздуха известна -

$$M = 29 \text{ г/моль},$$

то данная формула позволяет установить зависимость плотности воздуха от температуры (приложение 1) и проверить эту зависимость на опыте.

Одновременно можно выяснить существует ли зависимость между изменением плотности воздуха и состоянием погоды.

Библиографический список

1. Андрюшечкин С. М. Физика. 7 класс: учебник – Омск, 2009. -236 с.
2. Перышкин А. В., Родина Н. А. Физика: учеб. для 7 кл. сред. шк. – 11-е изд. – М: Просвещение,1991. – 174 с.
3. Андрюшечкин С. М. Физика в опытах и задачах: учебное пособие. – Петропавловск: Изд-во ИПКРО, 2007. – 132 с.
4. Кошкин Н. И., Ширкевич М. Г. Справочник по элементарной физике, - 10-е изд., испр. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.,1988. – 256 с.
5. Физика: учеб. для 10кл с углуб. изучением физики: профил. уровень /[О. Ф. Кабардин, В. А. Орлов, Э. Е. Эвенчик и др.];под ред. А. А. Пинского, О. Ф. Кабардира. – 10-е изд. – М.: Просвещение, 2007. – 431 с.
6. Тарасов Б. Н. Паскаль. – М.: Мол. гвардия, 1979. – 334с., ил. – (Жизнь замечат. людей. Серия биогр. Вып. 15. (599.)).
7. Электр. ресурс. Точка доступа: [www.http://elkin52.narod.ru/biograf/mendeleev2.htm](http://elkin52.narod.ru/biograf/mendeleev2.htm)

Приложение

Зависимость плотности воздуха от его температуры (при нормальном атмосферном давлении)

Теоретическое выражение:

$$\rho = pM/(RT).$$

$$p = 101325 \text{ Па}$$

$$M = 0,029 \text{ кг/моль}$$

$$R = 8,31 \text{ Дж/моль}$$

Расчетная формула:

$$\rho = 354/T(\text{K}) \text{ кг/м}^3.$$

t, °C	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
T, K	243	248	253	258	263	268	273	278	283	288	293	298	303
$\rho, \text{кг/м}^3$	1,46	1,43	1,4	1,38	1,35	1,32	1,3	1,27	1,25	1,23	1,21	1,19	1,17