



Майер Валерий Вильгельмович
*Доктор педагогических наук, профессор,
заведующий кафедрой физики
и дидактики физики,
декан физического факультета
Глазовского государственного
педагогического института.*



Вараксина Екатерина Ивановна
*Старший преподаватель кафедры физики
и дидактики физики Глазовского
государственного педагогического института.*

Воздушные шары в школе и дома

Предлагаются учебные экспериментальные исследования тепловых воздушных шаров. Описана простая модель монгольфьера из тонкой бумаги для опытов на открытом воздухе.

Испанские студенты под руководством своего преподавателя сделали из тонкой полимерной плёнки небольшой воздушный шар, наполнили его гелием, прикрепили к нему аппаратуру, включающую видеокамеру и радиомаяк, и отправили в полёт. Что бы вы думали, он поднялся на 30 км! Они получили великолепные фотографии

Земли и околоземного пространства из ближнего космоса.

Давайте и мы будем двигаться в этом направлении, начав с полётов воздушных шаров у себя дома и в кабинете физики.

Техника безопасности: работа с открытым огнём может проводиться только под руководством взрослых!

1. Несколько слов о воздухоплавании

В последние десятилетия стало популярным спортивное воздухоплавание. Вы видели воочию или наблюдали с экрана телевизора, как газовыми горелками нагревается воздух в огромных герметичных оболочках, которые постепенно расширяются и, наконец, взмывают в воздух. Этот вид спорта стал доступен благодаря тому, что появились

новые полимерные материалы – прочные, лёгкие и огнестойкие.

Измерения показали, что *удельная подъёмная сила* горячего воздуха при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет $\mu = 0,278\text{ кг/м}^3$. Это значит, что при температуре атмосферы $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ один кубический метр воздуха, нагретого

до 100 °С, способен поднять груз массой 278 г.

Первый *аэростат* появился ещё в июле 1783 г. во Франции: братья Монгольфье запустили наполненный горячим воздухом шар из бумаги и льняного полотна. В честь создателей подобные аэростаты стали называть *монгольфьерами*. В том же году в воздух поднялся первый человек (рис. 1) и впервые полетел воздушный шар, наполненный водородом.



Рис. 1

Аэростаты непрерывно совершенствовались и вскоре стали применяться в военных и научных целях. Типовой аэростат состоит из газонепроницаемой оболочки, вверху которой имеется клапан для выпуска газа или нагретого воздуха, а внизу – отверстие, сообщающееся с атмосферой. На оболочку накинута верёвочная сеть, к ней тем или иным способом прикреплены стропы, к которым привязана гондола. Гондола снабжена балластом, балластным канатом и якорем. Управление полётом аэростата производится посредством открывания и

закрывания клапана, сбрасывания балласта и т. д. В воздухоплавании используются также аэростаты с замкнутой оболочкой без отверстий, которые называются *дирижаблями*.

Аэростаты в наши дни принципиально не отличаются от своего прототипа, но для их изготовления используются современные материалы и технологии (рис. 2). Гондолу, однако, часто делают, как и на заре воздухоплавания, из ивовых прутьев или тростника. Температура воздуха в оболочке современного аэростата сравнительно невелика и обычно не превышает 95-100 °С.



Рис. 2

Полёты аэростатов дали немало научных результатов и рекордных достижений. Одним из последних является кругосветный беспосадочный полёт на монгольфьере, впервые совершённый в 1999 году Б. Пиккаром.

2. Комнатная модель воздушного шара

Широкое распространение в быту лёгких пластиковых пакетов и газовых зажигалок позволяет надеяться на возможность

осуществления полёта воздушного шара в домашних условиях. Теоретически обосновать такую возможность в состоянии даже

семиклассники, изучившие условия плавания тел.



Обозначим объём шара V , плотность относительно холодного воздуха комнаты ρ_1 и нагретого воздуха в оболочке шара ρ_2 . Сила Архимеда, действующая на шар, равна весу вытесненного шаром холодного воздуха $f_1 = \rho_1 g V$, а сила тяжести, действующая на нагретый воздух в шаре, равна $f_2 = \rho_2 g V$. Тогда подъёмная сила шара составляет

$$f = f_1 - f_2 = (\rho_1 - \rho_2) g V, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения.

Допустим, в вашем распоряжении имеется тонкий полиэтиленовый пакет размером 30×40 см. Если такой пакет наполнить воздухом, то получится тело, которое приближённо можно заменить параллелепипедом с основанием 15×15 см и высотой около 40 см. Объём надутого пакета примерно равен

$$V = 9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 = 9 \text{ л.}$$

Согласно табличным данным, плотность сухого воздуха при нор-

мальном давлении и температуре 20°C составляет $1,205 \text{ кг/м}^3$, а при 100°C равна $0,946 \text{ кг/м}^3$.

Подставляя эти значения в формулу (1), получаем, что подъёмная сила проектируемого воздушного шара может достигнуть величины $f = 2,28 \cdot 10^{-2} \text{ Н}$. Это значит, что шар сможет поднять груз (считая и его оболочку) массой $m = f/g = 2,33 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \approx \approx 2,3 \text{ г}$.

Проверить выполненный расчёт можно, если воспользоваться приведённым выше значением удельной подъёмной силы горячего воздуха: шар объёмом 9 л, воздух в котором нагрет до 100°C , сможет поднять груз массой $m = \mu V = 0,278 \cdot 9 \cdot 10^{-3} \approx \approx 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$. Это неплохо согласуется с полученным выше значением, особенно если учесть, что наш расчёт проведён для перепада температур не 100°C , а 80°C .

Итак, чтобы воздушный шар полетел вверх, сила тяжести, действующая на оболочку шара и другие его элементы, должна быть меньше силы Архимеда.

Для изготовления комнатной модели воздушного шара выберите тонкий полиэтиленовый пищевой пакет объёмом не менее 9 л. Вполне подойдут также пластиковые пакеты для мусора объёмом не более 30 л, если их масса не слишком велика. В диаметрально противоположных точках отверстия пакета привяжите концы нити длиной 50-60 см. На нить подвесьте канцелярскую скрепку.

Удерживая одной рукой пакет за верх, второй, расправив отверстие пакета внизу, поднесите к нему зажигалку и зажгите её. Когда пакет, наполняясь горячим воздухом, слегка расправится, его от-

пустите и перехватите шар за груз, висящий на нити.

Продолжайте нагревать воздух до тех пор, пока не почувствуете, что шар начинает «вырываться из рук» (рис. 3). Отпустите груз, и вы увидите, как шар взмывает вверх, достигает потолка, воздух в нём охлаждается, и шар грациозно опускается вниз к месту пуска.

Взвесьте оболочку вашего шара вместе с грузом и убедитесь, что её масса не превышает расчётной величины.



Рис. 3

3. Термоэлектрический измеритель температуры

Вряд ли вас вполне могут устроить сообщённые выше сведения и основанные на них правдоподобные рассуждения. Необходимы доказательные эксперименты, а для их постановки нужно уметь измерять температуру нагретого воздуха внутри воздушного шара. Обычный спиртовой термометр не подойдёт хотя бы потому, что обладает значительной тепловой инерцией. Поэтому придётся использовать какой-нибудь малоинерционный измеритель температуры, например, электронный.

Датчиком температуры такого прибора может служить термопара. Мы рекомендуем изготовить термопару медь-константан, с которой вы уже знакомы, если следите за нашими статьями в журнале (Потенциал, 2008, №2, №4). Дело в том, что медная и константановая проволоки всегда есть в кабинете физики: медная – в старых трансформаторах, константановая – в реостатах. Напомним, что удельная термоэдс пары медь-константан $\alpha = 41$ мкВ/град.

Итак, приготовьте два отрезка длиной примерно 0,5 м из медного и константанового проводов диаметром 0,15-0,25 мм. Концы подготовленных проводов длиной

около 5 мм острым ножом зачистите от изоляции и облудите оловом или оловянно-свинцовым припоем, используя в качестве флюса канифоль. Спаяйте эти концы между собой так, чтобы место соединения имело как можно меньшую массу.

Выводы получившейся термопары соедините с гибкими многожильными проводами и подключите к мультиметру, переведённому в режим измерения напряжения. В стакане вскипятите воду, выключите и уберите кипятильник, погрузите в воду спиртовой термометр и изготовленную термопару.

По мере охлаждения воды в стакане измеряйте её температуру и соответствующую термоэдс, развиваемую термопарой. Измерьте температуру воздуха. Постройте график зависимости термоэдс от разности температур термопары и окружающей среды, в которой находятся её выводы, соединённые с мультиметром. По градуировочному графику вы всегда сможете определить температуру воздуха в той области, в которой находится термопара.

Разумеется, можно обойтись и без градуировочного графика. Для этого нужно знать измеренную тер-

мометром температуру воздуха в помещении t_0 и измеренную мультиметром термоэдс \mathcal{E} термопары.

Тогда температура термопары, очевидно, равна

$$t = t_0 + \mathcal{E} / \alpha.$$

4. Исследование воздушного шара

Возможный вариант экспериментальной установки изображён на рис. 4. Вы видите, что установка состоит из двух скреплённых отрезком резинового шланга стоек, изогнутых из алюминиевой трубки или проволоки. На одной из стоек отрезками изолянта закреплена термопара, соединённая с мультиметром. Измерительный конец термопары находится вблизи верхней части стоек. На лабораторном столе находятся также пластиковый пакет (воздушный шар), спиртовка и газовая зажигалка.

Эксперимент проведите следующим образом. На стойки наденьте модель монгольфьера и её нить с гру-



Рис. 4



а

б

в

Рис. 5

зиком зацепите за отогнутые ножки стоек (рис. 5 а). Зажгите спиртовку и наблюдайте за показаниями мультиметра. По мере роста температуры воздуха внутри баллона он расширяется (рис. 5 б) и устремляется

вверх (рис. 5 в). Изменяя груз, определите подъёмную силу модели монгольфьера для данной температуры. Повторите эксперимент при различных значениях температуры воздуха в баллоне. Наконец, добей-

тесь максимально возможного значения температуры, при которой полимерная плёнка ещё не начинает плавиться, и определите максимальную подъёмную силу вашего аэростата.



Монгольфьер летает потому, что плотность нагретого воздуха внутри шара меньше, чем холодного снаружи.

Чтобы понять, почему плотность воздуха зависит от его температуры, нужно вспомнить газовые законы.

Согласно закону Гей-Люссака объём V данной массы m газа при постоянном давлении прямо пропорционален его абсолютной температуре T :

$$\frac{V}{T} = \text{const.} \quad (2)$$

Отсюда следует, что плотность газа $\rho = m/V$ при неизменном давлении обратно пропорциональна абсолютной температуре: $\rho T = \text{const.}$ Тогда для двух разных значений температуры T_1 и T_2 отношение соответствующих плотностей ρ_1 и ρ_2 равно:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{T_2}{T_1}. \quad (3)$$

Изменение плотности газа можно записать в виде:

$$\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2 = \rho_1 \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_1} \right).$$

Учитывая соотношение (3), отсюда получаем, что изменение плотности газа при нагревании его от температуры T_1 до $T_2 = T_1 + \Delta T$ составляет

$$\Delta\rho = \rho_1 \left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right) = \rho_1 \frac{\Delta T}{T_2}. \quad (4)$$

Поэтому воздух объёмом V , нагретый до температуры T_2 , при температуре окружающего воздуха T_1 согласно закону Архимеда (1) в состоянии поднять груз массой

$$m = \Delta\rho \cdot V = \rho_1 V \frac{\Delta T}{T_2}. \quad (5)$$

Подстановка в последнюю формулу значений $\rho_1 = 1,205 \text{ кг/м}^3$, $V = 9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, $T_2 = 373 \text{ К}$ и $\Delta T = 80 \text{ К}$ даёт значение $m = 2,33 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$, которое вполне согласуется с оценками, полученными выше.

Воздушный шар, в отличие, например, от дирижабля, снизу открыт. Это отверстие совершенно необходимо, иначе на большой высоте, где давление внешнего воздуха малó, внутреннее давление разорвёт оболочку шара.

В случае дирижабля подъёмная сила Архимеда обусловлена, очевидно, разностью давлений на верхнюю и нижнюю его поверхности. А за счёт чего появляется подъёмная сила воздушного шара?

Нетрудно сообразить, что в воздушном шаре или аэростате подъёмная сила возникает за счёт разности давлений извне и изнутри на одни и те же участки его оболочки. Вблизи нижнего отверстия аэростата эта разность давлений равна ну-

лю, так как внутренний объём аэростата свободно сообщается с атмосферой. В верхней части оболочки указанная разность давлений достигает максимума (рис. 6). Расчёт величины подъёмной силы в соответствии с этой моделью даёт такое же значение, как и при использовании модели замкнутой твёрдой оболочки, которая по умолчанию предполагалась ранее.

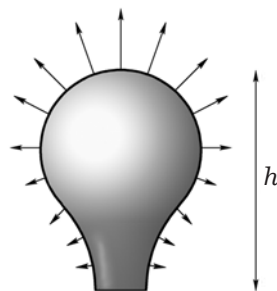


Рис. 6

5. Длительный полёт воздушного шара

Монгольфьер можно отправить в длительный полёт, если поднимающийся шар будет вместе с собой поднимать и источник тепла.

Проверить это можно на небольшом воздушном шаре, если закрепить под его отверстием тонкую нихромовую проволоку с ваткой. Смочите ватку в спирте и подожгите её – тогда шар отправится в полёт вместе с пламенем. *(Ставить этот опыт нужно при соблюдении всех мер предосторожности, в частности, правил пожарной безопасности).*

Для изготовления большого монгольфьера, способного подняться на десятки метров, приобретите кальку – тонкую прочную полупрозрачную бумагу, масса одного квадратного метра которой составляет в среднем 25 г. Продаётся она в рулонах шириной 0,64 м и длиной 10 м в магазинах канцтоваров.

Обычно рекомендуют изготовить монгольфьер в виде почти правильного шара. Однако мы занимаемся физикой, а не копированием сделанного другими, поэтому нам нужна простая конструкция многоразового использования.

На рис. 7 а приведена фотография бумажной оболочки монгольфьера. Чтобы сделать подобный аппарат, вначале постройте на кальке выкройку. Укажем характерные размеры: длина выкройки 120 см, расстояние от верха до наиболее широкой части 40 см, максимальная

ширина 60 см и ширина самой узкой части 30 см. По выкройке вырежьте четыре одинаковых листа. Не слишком густым клеем ПВА склейте сначала длинные стороны листов, а когда они подсохнут, – короткие. Особенно тщательно проклейте вершину будущего монгольфьера. Снизу из картона толщиной около 1 мм приклейте к оболочке полоску шириной 2-3 см так, чтобы получилось квадратное отверстие со стороной 30 см.

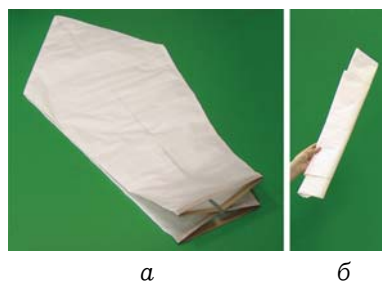


Рис. 7

После полного высыхания изделия сделайте шилом в картонной полоске посередине каждой стороны квадрата небольшие дырочки. В них закрепите крест из нихромовой проволоки (от спирали электроплитки).

Готовый монгольфьер сначала сложите как показано на рис. 7 а, а затем сверните в плоский рулон (рис. 7 б), начиная от вершины, чтобы сжимающийся в баллоне воздух не разорвал бумагу.

Из соображений пожарной безопасности пускать монгольфьеры мож-



но только вместе со взрослыми на открытой площадке в холодную безветренную погоду. Лучше воздушный шар не отправлять в свободный полёт, а запускать на привязи – тонкой прочной нити. Подъём шара на полтора-два десятка метров тоже производит достаточно сильное впечатление.

Перед запуском шар расправляют, держат за верх, в отверстии шара на середине проволочного перекрестия отрезком нихромового провода закрепляют вату и смачивают её спиртом. Далее спирт поджигают и держат шар до тех пор, пока он не начнёт вырываться из рук. После этого шар отпускают и он взмывает вверх (рис. 8).



Рис. 8

6. Для самостоятельного исследования

1. *Альтернативный источник тепла.* Вместо газовой зажигалки в домашних опытах можно использовать фен, который разогревает воздух до достаточно высокой температуры. Однако всё равно опыты нужно делать вместе со взрослыми, так как неизвестно, что опаснее, газовая зажигалка или сетевое напряжение 220 В.

2. *Высота газового пламени.* В газовой зажигалке имеется регулятор высоты пламени. Вместе с учителем разберитесь, как можно настроить зажигалку, чтобы она давала пламя высотой 8–10 см.

3. *Электронный термометр.* Чувствительность мультиметра недостаточна для того, чтобы обеспечить более или менее точное измерение температуры посредством термопары медь-константан. Попробуйте усилить термоэдс этой термопары в 100 раз с помощью операционного усилителя. Некоторые мультиметры комплектуются термопарами, специально предназначенными для измерения температуры. Выясните, насколько целесообразно использование подобного прибора в исследованиях монгольфьеров.

4. *Тепловой азростат.* Монгольфьер из бумаги можно отправлять в полёты и без источника тепла. Для этого нужно получить пламя в открытой жестяной банке, поперечный размер которой примерно в два раза меньше диаметра отверстия воздушного шара. Хорошее (но копящее) пламя получится, если фильтровальную бумагу намочить жидкостью для розжига древесного угля, дров и топливных брикетов (смесь жидких парафинов), которая имеется в продаже.

5. *Полёты в космос.* Составьте проект беспилотного азростата для подъёма на высоту порядка 50 км. Оцените возможность осуществления такого полёта со школьного двора. Определите максимальную высоту, на которую вы в состоянии запустить самодельный воздушный шар.