

Условие

Цель этого эксперимента — определить плотность ρ стекла, из которого изготовлена меньшая пробирка.

Погрузите пробирку в ёмкость с водой и снимите зависимость глубины погружения пробирки y от уровня x воды в ней. Добейтесь того, чтобы пробирка плавала вертикально! Что для этого нужно сделать?

В своей тетради начертите таблицу, в которую занесите зависимость y от x . Укажите, относительно какого уровня вы измеряете параметры x и y . По результатам своих измерений постройте график $y(x)$. На графике должно быть не менее 7 точек. Из графика найдите отношение внутреннего диаметра d пробирки к её внешнему диаметру D .

Независимо определите диаметры d и D и сравните их отношение с полученным ранее из графика.

Определите массу меньшей пробирки m , её объём V и рассчитайте плотность ρ .

Плотность воды $\rho_0 = 1,00 \text{ г/см}^3$.

Оборудование. Исследуемая малая пробирка; большая пробирка (или мензурка), в которую помещается исследуемая пробирка; ёмкость с водой, например, обрезанная сверху пустая пластиковая бутылка объёмом 1,5–2,0 л (ёмкость должна быть достаточно глубокой, чтобы пробирка полностью погружалась в воду); шприцы объёмом 1 мл и 20 мл; миллиметровая бумага; скотч и ножницы (по требованию).

Рекомендации организаторам

Внутренний диаметр большой пробирки должен быть больше внешнего диаметра малой (исследуемой) пробирки.

Примерные критерии оценивания

Указано, как добиться вертикального плавания пробирки 1
 Таблица измерений $y(x)$, не менее 7 точек 2
 Построен график $y(x)$, на котором не менее 7 точек 2
 По графику найдено отношение d/D 1
 Определён внешний диаметр D 1
 Определён внутренний диаметр d 1
 Выведена формула (1) для массы пробирки 1
 Измерены объёмы V_1 и V_2 :
 хотя бы при трёх различных глубинах погружения 2
 менее, чем при трёх различных глубинах погружения 1
 Полученное значение m 1
 Измерение объёма пробирки V 2
 Полученное значение ρ 1

Возможное решение

Для того, чтобы пробирка плавала вертикально, нужно налить в нее некоторое количество воды. Та часть пробирки, для которой мы проводим измерения глубины погружения, должна быть цилиндрической. Для измерения требуемых уровней воды наклеим на пробирку с помощью скотча полоску миллиметровой бумаги, которая будет служить нам шкалой. Параметры x и y можно измерять относительно произвольного фиксированного уровня.

Таблица 1: результаты измерений.

№	1	2	3	4	5	6	7
x , мм	30	33	34	38	41	43	47
y , мм	96	98	99	102	104	106	108

Пусть начальный объём воды в пробирке равен $V_{1,0}$, а начальный объём вытесненной пробиркой воды равен $V_{2,0}$. Тогда текущий объём воды в пробирке V_1 равен

$$V_1 = V_{1,0} + \frac{\pi d^2}{4} x,$$

а текущий объём вытесненной пробиркой воды V_2 равен

$$V_2 = V_{2,0} + \frac{\pi D^2}{4} y.$$

По закону Архимеда:

$$(m + \rho_0 V_1)g = \rho_0 V_2 g.$$

Подставив выражения для V_1 и V_2 в закон Архимеда, получим:

$$m + \rho_0 \left(V_{1,0} + \frac{\pi d^2}{4} x \right) = \rho_0 \left(V_{2,0} + \frac{\pi D^2}{4} y \right).$$

Из этой формулы видно, что y линейно зависит от x , то есть угловой коэффициент на графике (рис. 1) равен $k = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{d^2}{D^2}$. В нашем случае $k = 0,73 \pm 0,05$, откуда $\frac{d}{D} = \sqrt{k} = 0,85 \pm 0,03$.

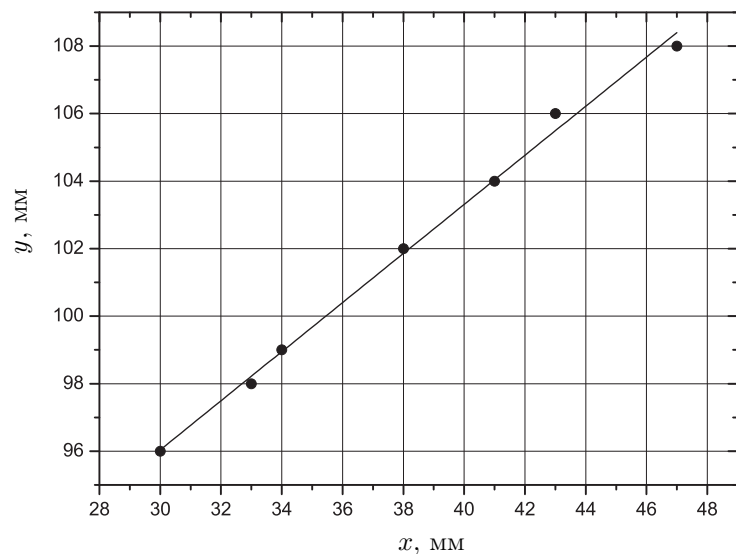


Рис. 1

Обмотав пробирку кусочком миллиметровой бумаги, определим периметр $P = \pi D = 50,0 \pm 1,0$ мм. Тогда внешний диаметр $D = 15,9 \pm 0,3$ мм.

Внутренний диаметр пробирки можно измерить, долив в неё шприцем воду и измерив изменение уровня Δx . Объём налитой воды $\Delta V_1 = \frac{1}{4}\pi d^2 \Delta x$ нам известен, поскольку мы наливаем её шприцем. У нас получилось $d = 14,0 \pm 0,7$ мм.

Объёмы V_1 и V_2 можно измерить непосредственно: воду в пробирку мы заливаем шприцем, а объём вытесненной воды найдём погружая малую пробирку в большую на ту же глубину. Тогда масса пробирки

$$m = \rho_0(V_2 - V_1). \quad (1)$$

Делаем это для 4-5 значений y и проводим усреднение.

$$m = 16,1 \pm 0,3 \text{ г.}$$

С помощью большой пробирки и шприцев, найдем внутренний $V_{1, \max}$ и внешний объём $V_{2, \max}$ исследуемой пробирки. Тогда объём стекла пробирки $V = V_{2, \max} - V_{1, \max}$. Полученное нами значение: $V = 7,5 \pm 0,3$ мл.

Находим плотность стекла:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad \rho = 2,15 \pm 0,12.$$

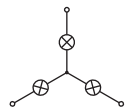
Условие

Рис. 2

Внутри «серого» ящика находятся три идеальные одинаковые батарейки, включенные в лучи «звезды». Выводы помечены буквами А, В, С.

Точка соединения трёх ламп изолирована.

1. Убедитесь, что яркости свечения (сопротивления) ламп действительно одинаковы. Поясните, как вы это установили.
2. Исследуйте схему соединения батареек в «сером» ящике с помощью трёх одинаковых ламп, соединённых «звездой» (рис. 2). Укажите схему соединения батареек внутри «серого» ящика.
3. Подключите к каждому выводу «серого» ящика по одному лучу «звезды», содержащей лампочки. Определите яркость свечения каждой лампы. Покажите теоретически, что указанная вами схема не противоречит полученным результатам.

Предостережение

Не оставляйте схему включённой на длительное время, чтобы не «сжечь» лампы и не разрядить батарею.

Оборудование. «Серый ящик» с батарейками, три лампы накаливания, соединённые «звездой».

Примерные критерии оценивания

Проверено, что лампы одинаковые.....	2
Указаны возможные способы подключения ламп к «серому» ящику.....	1
Указаны результаты измерений (1 балл за каждую пару выводов).....	3
Подбирается не только правильный вариант, но и исключаются остальные.....	0,5
Указано, что смена полярности батарей не приводит к изменению результатов измерений.....	0,5
Проведена проверка применимости 6 вариантов схем по измерениям с двумя лампами (по 0,5 балла за каждый).....	3
Показано, что в верной схеме к выводу С подключена одна батарея.....	1
Указано, что в отличить выводы А и В невозможно.....	1
Указан результат измерений при подключении трёх ламп.....	1
Проверено, что указанная схема не противоречит результатам измерений с тремя лампами.....	2

Возможное решение

1. Найдём такие выводы «серого» ящика, что при подключении двух ламп обе лампы светятся. Поскольку лампы соединены последовательно, то через них протекает ток одинаковой силы. Тогда одинаковая яркость свечения свидетельствует об одинаковой мощности и, следовательно, об одинаковом сопротивлении ламп. Достаточно проверки для двух разных пар ламп.
2. Для определения схемы в «сером» ящике наблюдаем за яркостью свечения ламп при их различном подсоединении к выводам серого ящика.

При подсоединении двух ламп получаем следующие результаты:

выводы А и В: две лампы горят **ярко**;

выводы А и С: две лампы горят **тускло**;

выводы В и С: две лампы горят **тускло**;

Определим схему, перебрав все варианты, и исключим те, которые не подходят под проведённые измерения. Все остальные возможные варианты (полученные заменой полярности батареек) будут давать тот же результат при присоединении ламп, что и 6 вариантов, приведённых ниже:

Схема	Причина, по которой не подходит, или указание верности схемы
	Существует пара выводов, для которых лампы не горят
	Для всех пар выводов лампы не горят
	Существует пара выводов, для которых лампы не горят
	Получаем три разных яркости
	Существует пара выводов, для которых лампы не горят
	Удовлетворяет всем условиям, верная схема

При подключении пар выводов, один из которых С, лампы горят тускло, поэтому выводу С соответствует луч с одной батарейкой. При подключении выводов А и В — две батарейки, лампы горят ярко.

Верная схема приведена на рис. 3. Луч с двумя батареями отличить от луча без батарей по характеру свечения нельзя, поэтому возможны две схемы (без учёта изменения полярностей).

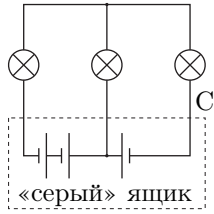


Рис. 3

3. При подсоединении трёх ламп к «серому» ящику: лампа А светится ярко, В — ярко, С — не светится. В этом случае, считая батареи идеальными, а сопротивления ламп одинаковыми, можно рассчитать схему и получить, что силы токов, текущих через выводы А, В равны, а через вывод С ток не течёт. Этот результат можно получить качественными рассуждениями. Если мысленно отключить лампу С, то напряжения на одинаковых лампах (подключенных к А и В) равны, и равны Э.Д.С. одной батареи. Тогда, учитывая полярность третьей батареи, лампа С подсоединяется к контактам, исходное напряжение на которых нулевое. Поэтому, она гореть не будет (даже независимо от её сопротивления), а лампы В и А будут гореть одинаково ярко.

Условие

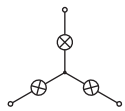


Рис. 4

Внутри «серого» ящика находятся три одинаковые батарейки, включенные в лучи «звезды». Выводы помечены буквами А, В, С. Точка соединения трёх ламп изолирована.

1. Убедитесь, что яркости свечения (сопротивления) ламп действительно одинаковы. Поясните, как вы это установили.
2. Исследуйте схему соединения батареек в «сером» ящике с помощью трёх одинаковых ламп, соединённых «звездой» (рис. 4). Укажите схему соединения батареек внутри «серого» ящика.

Примечание. Батарейка имеет внутреннее сопротивление, то есть её можно представить как идеальную батарейку с последовательно соединённым резистором сопротивлением r . Считайте, что $r \ll R$, где R — сопротивление лампы накаливания

Предостережение

Не оставляйте схему включённой на длительное время, чтобы не «сжечь» лампы и не разрядить батарею.

Оборудование. «Серый ящик» с батарейками, три лампы накаливания, соединённые «звездой».

Примерные критерии оценивания

Проверено, что лампы одинаковые.....	2
Указаны возможные способы подключения ламп к «серому» ящику.....	1
Указаны результаты измерений (1 балл за каждый способ подключения)...	4
Используется факт, что необходимо не только подобрать правильный вариант, но и исключить остальные.....	0,5
Используется факт, что смена полярности батарей не приводит к изменению результатов измерений.....	0,5
Проведена проверка применимости 6 вариантов схем по измерениям с двумя лампами (по 0,5 балла за каждый).....	3
Показано, что в верной схеме к выводу С подключена одна батарея.....	1
В случае если батарейки считаются не идеальными: Получено соотношение (2).....	3
В случае если батарейки считаются идеальными: Теоретически получен результат, подтверждающий измерения с тремя лампами.....	2
Сделан вывод, что контакты А и В не отличаются.....	1

Возможное решение

1. Найдём такие выводы «серого» ящика, что при подключении двух ламп обе лампы светятся. Поскольку лампы соединены последовательно, то через них протекает ток одинаковой силы. Тогда одинаковая яркость свечения свидетельствует об одинаковой мощности и, следовательно, об одинаковом сопротивлении ламп. Достаточно проверки для двух разных пар ламп.
2. Для определения схемы в «сером» ящике наблюдаем за яркостью свечения ламп при их различном подсоединении к выводам серого ящика. Существует три способа подсоединения двух ламп (к выводам А и В, А и С, В и С) и один — трёх ламп (к А, В и С одновременно).

При подсоединении двух ламп получаем следующие результаты:

выводы А и В: две лампы горят **ярко**;

выводы А и С: две лампы горят **тускло**;

выводы В и С: две лампы горят **тускло**;

При подсоединении трёх ламп к «серому» ящику: лампа А светится ярко, В — ярко, С — не светится.

3. Определим схему, перебрав все варианты, и исключив те, которые не подходят под проведённые измерения. Все остальные возможные варианты (полученные заменой полярности батареек) будут давать тот же результат при присоединении ламп, что и 6 вариантов, приведённых ниже:

Схема	Причина, по которой не подходит, или указание верности схемы
	Существует пара выводов, для которых лампы не горят
	Для всех пар выводов лампы не горят
	Существует пара выводов, для которых лампы не горят
	Получаем три разных яркости
	Существует пара выводов, для которых лампы не горят
	Удовлетворяет всем условиям, верная схема

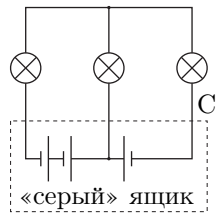


Рис. 5
выводы В, С выражаются через I_A :

$$I_C = \frac{2}{3} \cdot \frac{r}{R} \cdot I_A, \quad I_B = \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{r}{R}\right) I_A.$$

При соотношении $r \ll R$ верны неравенства:

$$I_C \ll I_A < I_B. \quad (2)$$

Таким образом, выводы однозначно определяются, так как лампа С не горит, а В должна светить ярче, чем А. Заметить эту разницу не всегда возможно; это зависит от того, чему равно отношение r/R .

Если считать батареи идеальными ($r = 0$), то ток через вывод С не течёт, а для выводов А и В верно соотношение: $I_A = I_B$. Этот результат можно получить качественными рассуждениями. Если мысленно отключить лампу С, то напряжения на одинаковых лампах (подключенных к А и В) равны, и равны Э.Д.С. одной батареи. Тогда, учитывая полярность третьей батареи, лампа С подсоединяется к контактам, исходное напряжение на которых нулевое. Поэтому, она гореть не будет (даже независимо от её сопротивления), а лампы В и А будут гореть одинаково ярко, поэтому отличить выводы А и В нельзя.

Верная схема приведена на рис. 5.

Условие

Теоретическое введение.

Осмос — это диффузия растворителя в раствор через полупроницаемую мембрану. Мембрана пропускает молекулы растворителя, но оказывается непроницаемой для молекул растворенного вещества. Осмос стремится выровнять концентрации раствора по разные стороны мембраны. Осмос продолжается до тех пор, пока вызванная им разность давлений не достигнет определенного предела, называемого осмотическим давлением. Например, осмотическое давление сладкого чая относительно несладкого превышает 2 атм, а в клетках многих растений оно может достигать 20 атм (что обеспечивает поступление воды из почвы к кроне деревьев). Растительная клетка представляет собой осмотическую систему, у которой полупроницаемой мембраной, разделяющей раствор клеточного сока от наружного раствора (воды), является клеточная стенка.

Осмотическое давление сильно разбавленных растворов недиссоциирующих веществ численно равно давлению, которое оказало бы растворенное вещество, если бы оно при данной температуре находилось в состоянии идеального газа и занимало объем, равный объему раствора (закон Вант-Гоффа):

$$p_{\text{осм}} = nkT,$$

где n — число молекул растворенного вещества в единице объема, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура. Заметим, что $p_{\text{осм}}$ для любых растворов не зависит ни от природы растворенного вещества и растворителя, ни от устройства мембраны (лишь бы она была полупроницаема).

Для растворов электролитов в законе Вант-Гоффа появляется поправочный коэффициент i

$$p_{\text{осм}} = inkT,$$

обусловленный диссоциацией электролита в растворе.

В этом эксперименте определение осмотического давления основано на подборе внешнего раствора с известной концентрацией, равной концентрации растворенного вещества в клетках исследуемых тканей. При погружении полосок исследуемой ткани (картофеля) в раствор с повышенной концентрацией, полоски тканей теряют воду и их длина уменьшается. Если же внешний раствор обладает пониженной концентрацией, то клетки поглощают воду из раствора, их объем увеличивается и, соответственно, длина ткани увеличивается.

Примечание: молярностью (или молярной концентрацией) раствора называется отношение числа молей растворенного вещества к объему раствора, выраженному в литрах. Например, в 0,5 М растворе NaCl — на 1 л раствора приходится 0,5 моль NaCl.

Ход работы. Приготовьте из 1 М раствора NaCl и дистиллированной воды растворы различных концентраций (от 1,0 М до 0,00 М, что соответствует дистиллированной воде). Опишите, как вы это делали. Из картофельного

клубня при помощи ножа вырежьте пластинку толщиной 4–5 мм (рекомендуем резать вдоль клубня). Из пластинки нарежьте 6 полосок шириной 3–4 мм. Подрежьте концы полосок так, чтобы они были примерно одинаковой длины. Тщательно измерьте длину каждой полоски (укажите, с какой точностью вам удалось это сделать) и поместите по одной в приготовленные растворы. Полоски должны быть полностью погружены в раствор. Все операции делайте достаточно быстро, не допуская подвядания полосок. Через 20 минут извлеките полоски, и тщательно измерьте их длину. Результаты занесите в таблицу, в которой укажите молярность раствора, в которую была погружена данная полоска, длину полоски до и после нахождения в растворе, изменение длины полоски. Нарежьте новые полоски картофеля и повторите эксперимент. Постройте график изменения длины полоски от молярности раствора, в котором эта полоска находилась. Из графика найдите молярность раствора в клетках картофеля. Оцените погрешность ваших измерений.

Найдите осмотическое давление $p_{\text{осм}}$ предоставленного вам картофеля.

Значения коэффициента i для растворов NaCl (25°C) различных молярностей указаны в таблице:

$C, \text{ M}$	1	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,01
i	1,62	1,64	1,66	1,68	1,7	1,73	1,75	1,78	1,83	1,91

Оборудование. 0,2 литра 1 М раствора NaCl; 0,5 литра дистиллированной воды или бутилированной питьевой воды; шприц на 10 мл; штатив (кассета) для пробирок; 6 пробирок; нож или скальпель для нарезки полосок тканей картофеля; линейка; крупный удлиненный клубень картофеля; тарелка; пинцет (или стеклянная палочка); одноразовый стакан на 0,2 л; ёмкость для слива отработанной воды; часы (индивидуальные или настенные в аудитории).

Примерные критерии оценивания

Описано, как получить раствор заданной концентрации.....	1
Таблица измерений.....	3
из них:	
количество точек.....	1
разумный шаг измерений.....	1
Вторая серия проводилась в более узком диапазоне концентраций.....	2
Построен график, на который нанесены все точки из таблицы.....	2
Проведена сглаживающая кривая, по точке пересечения найдена концентрация NaCl в клеточном соке.....	1
Полученная концентрация C лежит в диапазоне [0,25; 0,35] М.....	3
[0,2; 0,4] М.....	2
[0,1; 0,5] М.....	1
Получена формула для вычисления осмотического давления.....	1
По полученному значению концентрации правильно рассчитано осмотическое давление картофеля.....	1

Возможное решение

Чтобы получить раствор NaCl молярности x М ($0 \leq x \leq 1$) нужно смешать объём xV 1,0 М раствора с объёмом $(1-x)V$ дистиллированной воды. Объёмы измеряем шприцем. Приготовив растворы различных концентраций, проведём первую серию измерений. Посмотрим, при каких концентрациях длина полоски почти не меняется. Этот диапазон имеет смысл исследовать подробнее. Поэтому приготовим новые растворы, концентрации которых будут лежать в этом диапазоне, и проведём вторую серию измерений. Результаты измерений нанесём на график, по полученным точкам проведём сглаживающую кривую. Пересечение этой кривой с осью абсцисс даёт искомую концентрацию NaCl в клеточном соке картофеля. Эта концентрация зависит от условий хранения картофеля, но в большинстве случаев лежит в диапазоне $[0,25; 0,35]$ М.

Зная концентрацию C можно найти осмотическое давление картофеля по формуле $p_{\text{осм}} = iCRT$, которая получается из формулы, данной в условии, если учесть, что $nkT = CN_AkT = CRT$. Нужно значение i брать из таблицы, приведённой в условии. При расчёте нужно перевести концентрацию из моль/л в моль/м³, чтобы получить значение давления в Па. В большинстве случаев осмотическое давление картофеля лежит в диапазоне $(11 \div 15) \times 10^5$ Па, то есть $10 \div 15$ атм.

Условие

Цепной линией называют кривую, образуемую подвешенной за концы однородной массивной нитью. Пусть погонная плотность нити (масса единицы длины нити) μ , а её натяжение в нижней точке T_0 . Величина $\lambda = T_0/\mu g$ является параметром, определяющим форму цепной линии. Если начало координат поместить в низшей точке цепной линии, то её можно задать уравнением:

$$y = \lambda \left[\frac{1}{2} \left(e^{x/\lambda} + e^{-x/\lambda} \right) - 1 \right].$$

От Вас не требуется вывод зависимости вертикальной координаты y точки нити от горизонтальной координаты x . Вам следует разобраться в связи y и s , где s — длина отрезка нити, отсчитываемая от низшей точки. Теоретическую зависимость Вы должны проверить, проведя измерения с цепочкой из скрепок.

Теоретическая часть:

1. Пусть натяжение нити в нижней точке равно T_0 . Для малого отрезка нити длиной Δs получите выражение для разницы сил натяжения ΔT на его концах, выразив его через μ , и разность высот Δy концов отрезка.
2. Получите выражение для натяжения T нити на высоте y относительно нижней точки при заданном T_0 ?
3. Докажите, что если верхняя точка нити длины s возвышается над низшей точкой на высоту y (рис. 6), то

$$\lambda = \frac{T_0}{\mu g} = \frac{s^2 - y^2}{2y}.$$

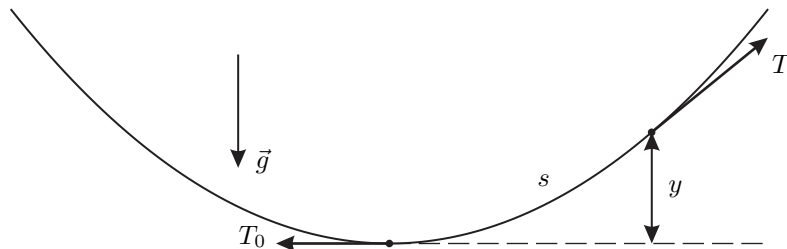


Рис. 6

Экспериментальная часть:

4. Соберите из выданных вам скрепок цепочку. Подвесьте склеенный лист бумаги и цепочку на бруске так, чтобы максимальный провис H составлял $(0,3 \div 0,5)L$, где L — расстояние между точками подвеса цепочки. Укажите выбранное вами значение H/L , число скрепок n и длину l скрепки (расстояние между точками соприкосновения её с соседними скрепками).

5. Отметьте фломастером на листе бумаги положения последовательных точек соприкосновения скрепок, начав с низшей точки (считайте её нулевой). Определите высоты этих точек, и результаты измерений занесите в таблицу.
6. Для каждой точки рассчитайте по измеренным высотам y_i и номеру n_i значения параметра λ .
7. Укажите номера скрепок, для которых проявляется заметное отличие реальной цепочки от идеальной (заметное отличие параметра λ от его среднего значения).
8. Вычислите среднее значение λ .
9. Вычислите среднее отклонение от среднего значения λ .
10. Найдите отношение натяжения в нижней точке к весу одной скрепки:

$$\tau = \frac{T_0}{mg}.$$

Указание: на выданном вам листе отметьте и пронумеруйте точки сцепления скрепок, подпишите рядом их высоты, а результаты измерений и их обработки представьте в таблице. Лист подпишите. По окончании тура вложите его в тетрадь с отчетом о проделанной работе и сдайте вместе с нею.

Оборудование. 30–40 скрепок, лист бумаги формата А2, пенополиуретановый плитус или деревянный брусок длиной 70–100 см (для крепления бумаги и цепочки: он кладётся на край стола, а цепочка и бумага свисают ниже столешницы), фломастер, 4 «силовые» металлопластиковые кнопки, линейка длиной 40 см.

Примерные критерии оценивания

Пункт 1 задания.....	2
Пункт 2 задания.....	1
Пункт 3 задания.....	1
Указано H/L , число скрепок n	1
Длина l измерена с точностью хотя бы 0,1 мм.....	1
Наличие 15 или более отмеченных точек с указанием высот и номера (не обязательно подряд).....	1
Выведена формулы для λ через n_i и l_i	1
Наличие таблицы с данными и обработкой не менее 15 точек.....	2
Указано, для каких скрепок имеется заметное отклонение от теоретического значения.....	1
Попадание в ворота для среднего значения λ	2
Попадание в ворота по $(\Delta\lambda)_{\text{ср}}$	1
Найдено $\tau = T_0/mg = \lambda_{\text{ср}}/l$	1

Возможное решение

1. Для малого отрезка нити длиной Δs с углом наклона α к горизонтали разница сил натяжения на концах $\Delta \vec{T} = -\mu \vec{g} \Delta s$, а изменение величины силы натяжения равно проекции вектора $\Delta \vec{T}$ на направление вектора \vec{T} :

$$\Delta T = |\Delta \vec{T}| \sin \alpha = \mu g \Delta s \sin \alpha = \mu g \Delta y.$$

2. На высоте y натяжение нити $T = T_0 + \mu g y$.

3. Рассмотрим отрезок нити от нижней нулевой точки до точки, находящейся на высоте y при длине отрезка s . Пусть T натяжение в этой точке, а T_x и T_y его проекции на горизонталь и вертикаль. Запишем условие равновесия нити в проекциях на горизонталь и вертикаль: $T_x = T_0$ и $T_y = \mu g s$. Отсюда

$$T^2 = T_0^2 + (\mu g s)^2. \quad (3)$$

После подстановки $T = T_0 + \mu g y$ в уравнение (3) находим

$$\lambda = \frac{T_0}{\mu g} = \frac{s^2 - y^2}{2y}.$$

4. Отметим H/L , число скрепок n . Для повышения точности длину одной скрепки l измеряем по длине натянутого отрезка цепочки из 30–40 скрепок.

5. Если цепочка скрепок подвешена на небольшом расстоянии от миллиметровой бумаги, то положение точек соприкосновения можно отметить с точностью 0,5–1 мм.

6. Рассчитываем λ по формуле:

$$\lambda = \frac{(n_i l)^2 - y_i^2}{2y_i}.$$

Результаты эксперимента приведены в таблице.

Таблица 2: результаты измерений.

№	y (мм)	λ (мм)	$\Delta \lambda$ (мм)
1	8	39	
2	11	119	
3	18	161	4
4	31	160	5
5	45	166	1
6	60	175	10
7	79	172	7
8	99	171	6
9	120	170	5
10	143	168	3
11	163	172	7
12	185	172	7
13	207	175	10
14	231	167	2
15	256	172	7
16	280	167	2
17	304	172	7
18	330	170	5
19	355	149	16
20	369	156	9

$H/L = 370/660 = 0,56$,
 $n = 42$ скрепки,
 $l = 25,9$ мм,
 $\lambda_{\text{ср}} = 165$ мм, $(\Delta \lambda)_{\text{ср}} = 6$ мм.
 $\tau_{\text{ср}} = 6,33$, $\varepsilon_{\tau} = 4\%$.
 Для первых двух нижних скрепок заметное отличие λ от теоретического значения. Эти значения λ исключены из определения среднего. Разброс для λ сопоставим с тем, что следует из погрешности измерения y (2%) и «сдвига» на 1 и 2 скрепки.
 Вывод: цепочка скрепок в целом адекватно моделирует цепную линию, за исключением ближней окрестности нижней точки

Условие

Необходимые сведения

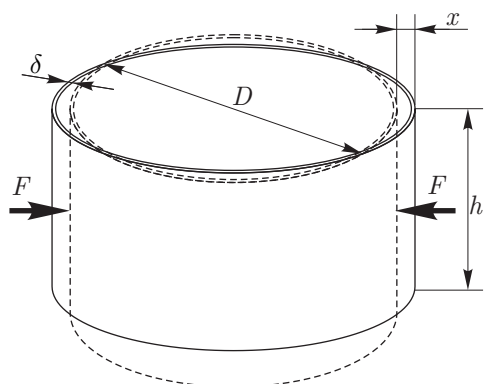


Рис. 1

Скорость звука в твёрдом теле можно рассчитать по формуле $c = \sqrt{E/\rho}$, где E — модуль Юнга, ρ — плотность вещества. Модуль Юнга характеризует упругие свойства вещества, определяя жесткость различных систем и конструкций. Например, относительная деформация ε стержня сечением S под действием растягивающей (или сжимающей) силы F равна

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{F}{SE}$$

Эту формулу можно принять в качестве определения модуля Юнга.

Относительное изменение диаметра D кольца шириной h и толщиной стенки δ под действием двух сосредоточенных сил F , действующих вдоль диаметра (рис. 1), при небольших деформациях x можно найти по формуле:

$$\varepsilon = \frac{x}{D} = \beta F^m E^n D^p h^q \delta^i, \tag{1}$$

где m, n, p, q, i — некоторые целые числа, а β — безразмерный коэффициент.

Задание

1. Руководствуясь соображениями размерностей, известными физическими законами и проведя необходимые измерения, определите показатели степеней m, n, p, q, i в законе деформации кольца (1). Запишите полученный закон деформации кольца.
2. По известной скорости звука $c_0 = 5240$ м/с в алюминии (плотность $\rho_{Al} = 2,70$ г/см³) определите скорость звука c в полиэтилентерефталате ($\rho_{ПЭТ} = 1,39$ г/см³).

Оборудование. Тонкостенное алюминиевое кольцо известной массы (указана на внутренней стороне кольца), два тонкостенных кольца из полиэтилентерефталата (ПЭТ) одинаковой ширины и разных диаметров (масса колец также указана на их внутренней стороне), нить, линейка, миллиметровая бумага, скотч и ножницы (по требованию).

Примерные критерии оценивания

Обоснован и получен результат $m = 1$ 1

Обоснован и получен результат $q = -1$ 1
 Обоснован и получен результат $n = -1$ 1
 Получено уравнение (2) 1
 Указан способ деформирования колец одинаковой силой 2
 Приведены измерения длин окружности L_1 и L_2 1
 Указано, что толщина колец $\delta = m/(\rho Lh)$ 1
 Приведены измерения деформаций x_1 и x_2 при одинаковой силе 1
 Получен результат $p = 2$ 1
 Найдено значение числа $i = -3$ 1
 Записан закон деформации кольца (3) 1
 Указаны способ нахождения скорости звука в ПЭТ (например формула (4)) 1
 Приведены результаты измерений деформаций колец из разных материалов 1
 Получен ответ для скорости звука c с точностью 20% 1

Возможное решение

1. **Закон деформации колец.** Проанализируем уравнение (1). По закону Гука малые деформации пропорциональны силе: $\varepsilon \sim F$, поэтому $m = 1$.

Увеличение ширины кольца в два раза (при прочих равных параметрах кольца) можно представить как два кольца, расположенных рядом. Следовательно, для сохранения относительной деформации потребуется в два раза большая сила. Учитывая, что $m = 1$ получаем $\varepsilon \sim \frac{F}{h}$, $q = -1$.

Размерность модуля Юнга $[E] = \text{Н/м}^2 = \text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$. Для исключения размерности массы и времени (которые присутствуют в силе F и модуле Юнга E) следует считать, что $\varepsilon \sim \frac{F}{E}$, поэтому $n = -1$.

Поскольку ε – безразмерная величина, должно выполняться равенство:

$$m - n + p + q + i = 0. \quad (2)$$

С учётом найденных ранее коэффициентов получим:

$$p + i = -1.$$

Для определения показателя степени p проведём эксперимент с двумя кольцами из ПЭТ. Измерим ширину h и длину окружности $L = \pi D$ полиэтилентерефталатовых колец. Зная массу m и плотность ρ этих материалов, вычислим толщину колец $\delta = m/(\rho Lh)$. Получим, что $\delta_2 \approx \delta_1$.

Сложим кольца в виде «восьмёрки» и стянем их ниткой. Деформирующая сила для обоих колец будет одинакова. Измеряем абсолютные деформации диаметров колец x_1, x_2 в этом случае.

По условию, ширина колец h одинакова, поэтому для нахождения p используем уравнение:

$$\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^p = \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^p.$$

В нашем случае получилось уравнение $1,5^p = 2,3$. Его корнем является число $p \approx 2,05$. Так как по условию p – целое число, то примем $p = 2$.

Показатель степени i находим из уравнения: $i = -p - 1 = -3$.

Закон деформации кольца имеет вид:

$$\varepsilon = \frac{x}{D} = \beta \frac{FD^2}{Eh\delta^3}. \quad (3)$$

Для справки, точная формула имеет вид:

$$\varepsilon = \frac{x}{D} = \left(\frac{3\pi^2 - 24}{8\pi}\right) \frac{FD^2}{Eh\delta^3}.$$

(Ландау, Лифшиц, т. VII, Теория упругости).

2. **Скорость звука.** Деформацию кольца x выражаем через скорость звука c и массу кольца m :

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \frac{D^2}{\delta} \sqrt{\frac{\pi\beta F}{mx}}$$

Если кольца деформировать одной и той же силой, то для отношения скоростей звука получаем:

$$c = c_0 \left(\frac{D}{D_0}\right)^2 \left(\frac{\delta_0}{\delta}\right) \sqrt{\frac{m_0 x_0}{mx}}. \quad (4)$$

Деформируем кольца одинаковой силой (для этого достаточно расположить их в виде восьмёрки и стянуть одной и той же нитью). Измеряем их деформации (x – для кольца из полиэтилентерефталата и x_0 – для кольца из алюминия). По полученным данным находим скорость звука в полиэтилентерефталате: $c = 1450$ м/с.