

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ТУР****9 КЛАСС****9.1 Пружина**

*Задание:* Определите количество  $N$  витков во всей пружине и коэффициент жесткости  $k_1$  одного ее витка. Проверьте, выполняется ли закон Гука при растяжении пружины силой, не превышающей  $m_0g$ , где  $m_0$  – масса выданного вам груза. Часть витков пружины находится внутри непрозрачного экрана, разбирать который запрещено.

*Оборудование:* Пружина с экраном, груз, штатив, весы, линейка, миллиметровая бумага для построения графиков (на бланке).

**9.2 Сироп**

*Задание:* Определите удельную теплоемкость пятидесятипроцентного раствора сахара при температуре  $50 - 60^\circ\text{C}$ .

*Примечание:* Пятидесятипроцентным раствором называется раствор, половину массы которого составляет растворенное вещество. Удельная теплоемкость лабораторного стекла  $840 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ , удельная теплоемкость воды  $4200 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ .

*Оборудование:* Мерная колба объемом  $50$  мл, мультиметр с термомпарой, весы, секундомер, стакан с водой, стакан с сахарным песком, стакан из пенопласта (термостат), стакан с «носиком», ложечка для размешивания раствора, горячая вода по требованию, миллиметровая бумага для построения графиков (на бланке), салфетки для поддержания порядка.

## РЕШЕНИЕ

## 9.1. Пружина (Кармазин С.)

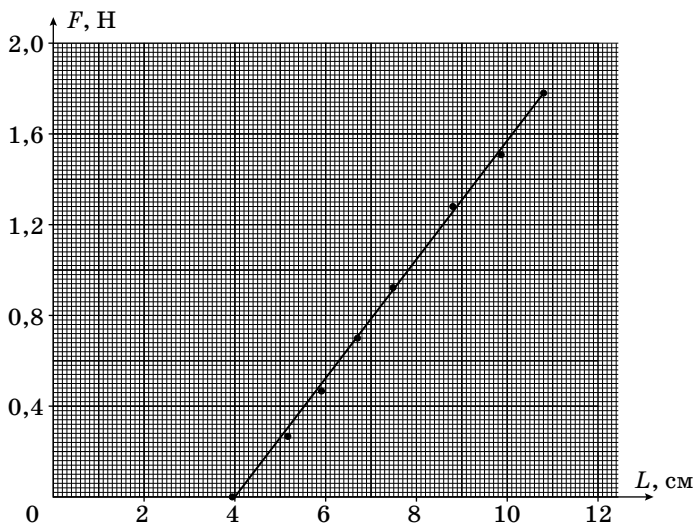
**Способ 1.** Количество витков пружины, задействованных при ее растяжении, можно изменять, перемещая пластину, к которой крепится крючок. Обозначим  $N$  – общее количество витков в пружине,  $n$  – количество витков, на которое пружина укорочена.

Закрепим рядом линейкой пружину с грузом на штативе, а под груз поставим весы. Опуская муфту штатива, ослабляем натяжение пружины и увеличиваем нагрузку на весы. Обозначим  $M$  – показание весов,  $m_0$  – масса груза,  $F = (m_0 - M)g$  – сила натяжения пружины. При различных

$n$  снимаем зависимость длины внешней части пружины  $L$  от силы натяжения  $F$  (см. таблицу) и строим ее график. Ниже представлен график  $F(L)$  для  $n = 6$ , из которого получаем коэффициент

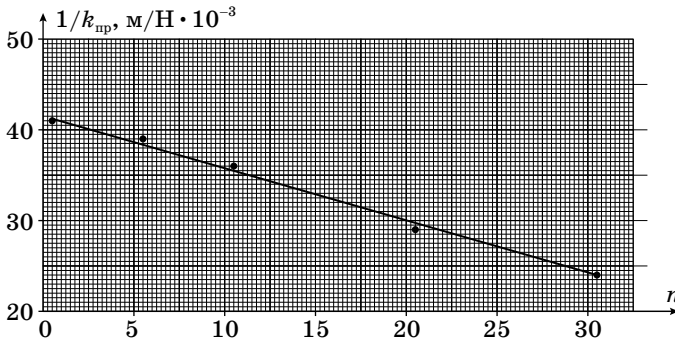
$n$	$k_{\text{пр}}$ Н/м	$1/k_{\text{пр}}$ , м/Н $\cdot 10^{-3}$
1	24,5	41
6	25,7	39
11	27,8	36
21	34,0	29
31	42,4	24

жесткости пружины, укороченной на  $n = 6$  витков  $k_6 = 25,4$  Н/м.



Коэффициент жесткости пружины, состоящей из  $N - n$  витков равен  $k_{\text{пр}} = k_1 / (N - n)$ , где  $k_1$  – коэффициент жесткости одного витка. Откуда  $1/k_{\text{пр}} = N/k_1 - n/k_1(1)$ .

Ниже представлен график зависимости  $1/k_{\text{пр}}$  от  $n$ , которая является линейной функцией. По наклону прямой определяем  $k_1 = 1710 \text{ Н/м}$ , а по пересечению прямой с вертикальной осью находим  $N = 0,042k_1 = 72$  витка. Случайная погрешность определения  $k_1$  составила 12%. Получаем  $k_1 = 1710 \pm 200 \text{ Н/м}$ .



**Способ 2.** Пусть расстояние от точки крепления пружины внутри экрана до нижнего края экрана  $L_0$ , а выступающей из экрана части пружины  $L_1$ . Одновременно с измерением зависимости  $L_1$  от силы растяжения полной пружины  $F$  определяем количество витков  $m$  на длине  $L_1$ . Из пропорции  $(L_0 + L_1)/N = L_1/m$  получаем зависимость  $1/m = 1/N + L_0/(L_1N)$ , линейный график которой в осях  $1/L_1$ ,  $1/m$  отсекает значение  $1/N$  на вертикальной оси. Для пружины, измеренной с помощью первого способа, вторым способом получен результат  $N=69$ . По зависимости  $L_1(F)$  определяем коэффициент жесткости полной пружины  $k_N = 24,5 \text{ Н/м}$ , а коэффициент жесткости одного витка  $k_1 = k_N N = 1690 \text{ Н/м}$ .

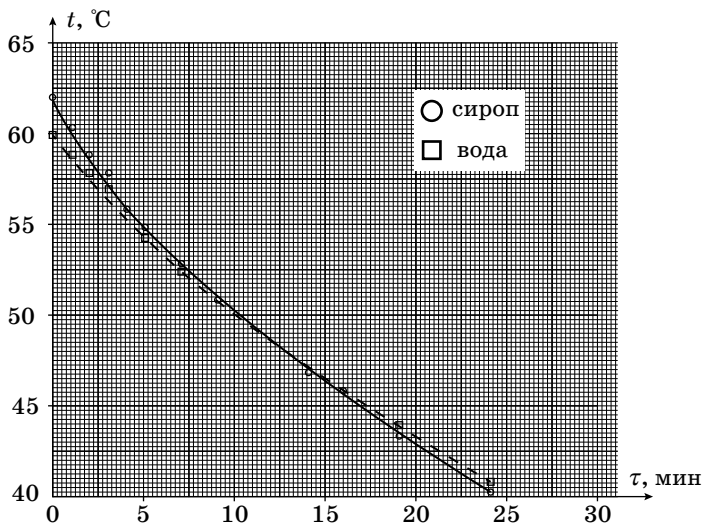
## 9.2. Сироп (Кармазин С.)

Определим коэффициент теплоотдачи пикнометра, заполненного водой до 50 мл. Для этого заливаем в пикнометр горячую воду, помещаем в центральную часть объема пикнометра термометр и снимаем зависимость температуры воды от времени.

$\tau, \text{мин}$	$t_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{с}}, ^\circ\text{C}$
0	60	62
1	59	60,5
2	58	59
3	57	58
4	56	56
5	54,5	55
7	52,5	53
9	51	51
14	47	47
16	46	46
19	44	43,5
24	41	40,5

Количество теплоты  $\Delta Q$ , отданное заполненным пикнометром в окружающую среду за время  $\Delta t$  из уравнения теплового баланса равно  $\Delta Q = (c_{\text{в}} m_{\text{в}} + c_{\text{с}} m_{\text{с}}) \Delta t = \alpha (t - t_0) \Delta \tau$ , где  $c_{\text{в}}$  – удельная теплоемкость воды,  $m_{\text{в}}$  – масса воды,  $c_{\text{с}}$  – удельная теплоемкость лабораторного стекла,  $m_{\text{с}}$  – масса пикнометра,  $t_0$  – температура воздуха в комнате. Необходимость учитывать теплоемкость пикнометра при выполнении данной задачи можно будет оценить на заключительном этапе ее решения. График зависимости температуры воды от времени представлен на рисунке ниже (пунктирная линия). Для наглядности при построении графика от измеренных значений температуры вычтены  $40^\circ\text{C}$ . Проведя касательную к графику, вычисляем скорость изменения температуры воды при любой интересующей нас температуре. В данном решении вычисления проводились при температуре  $52^\circ\text{C}$ . Комнатная температура равнялась  $20^\circ\text{C}$ . Для скорости изменения температуры пикнометра с водой получено значение  $(\Delta t / \Delta \tau)_{\text{в}} = 0,017^\circ\text{C}/\text{с}$ , а для коэффициента  $\alpha = 0,12 \text{ Вт}/^\circ\text{C}$ . Для воды:

$$\alpha = \left( \frac{\Delta t}{\Delta \tau} \right)_{\text{в}} \frac{c_{\text{в}} m_{\text{в}} + c_{\text{с}} m_{\text{с}}}{t - t_0}$$



Далее, приготовим 50%-ый раствор сахара (сироп). Для этого в стакан с «носиком» насыпем 50 г сахарного песка, а затем нальем 50 г воды. Полученную смесь тщательно перемешаем до полного растворения сахара. Перельем сироп в пикнометр до отметки 50 мл. Определим массу 50 мл раствора. Она равна  $61,1 \pm 0,1$  г. Таким образом, плотность сиропа  $\rho = 1,22$  г/см<sup>3</sup>.

Подогреем сироп в пикнометре до температуры на 5 – 10 °С больше, чем температура, на которой проводился расчет коэффициента теплоотдачи для чистой воды. Вновь снимаем зависимость температуры содержимого пикнометра от времени. Результаты также представлены в таблице и на графике (сплошная линия). Из графика по наклону касательной опять находим скорость остывания пикнометра с сиропом  $(\Delta t / \Delta \tau)_c$  при 52 °С. Видно, что скорости остывания пикнометра с чистой водой и с сиропом практически одинаковы.

Уравнение теплового баланса для сиропа имеет вид  $\Delta Q = (c_p m_p + c_c m_c) \Delta t = \alpha (t - t_0) \Delta \tau$ . В случае если скорости остывания с водой и с сиропом определялись при одинаковой температуре, удельную теплоемкость сиропа находим с помощью выражения:

$$c_p m_p + c_c m_c = \frac{\alpha (t - t_0)}{\left( \frac{\Delta t}{\Delta \tau} \right)_p}$$

$$c_P m_P = \frac{\left(\frac{\Delta t}{\Delta \tau}\right)_B}{\left(\frac{\Delta t}{\Delta \tau}\right)_P} (c_B m_B + c_C m_C) - c_C m_C = c_B m_B \frac{\left(\frac{\Delta t}{\Delta \tau}\right)_B}{\left(\frac{\Delta t}{\Delta \tau}\right)_P} + c_C m_C \left( \frac{\left(\frac{\Delta t}{\Delta \tau}\right)_B}{\left(\frac{\Delta t}{\Delta \tau}\right)_P} - 1 \right)$$

Оценка показывает, что второе слагаемое, учитывающее теплоемкость стекла пикнометра, не превышает 1,5% от величины первого слагаемого. Поэтому теплоемкость пикнометра можно не учитывать.

Окончательно получаем  $c_p = 3000 \pm 300$  Дж/(кг · °С). Основная погрешность обусловлена точностью нахождения скорости остывания по экспериментальной кривой графическим методом. Скорость остывания можно определить с точностью порядка 5%. Так как в окончательное выражение входит отношение двух скоростей остывания, то погрешность  $c_p$  составит 10 %.

Основное отличие экспериментально полученной теплоемкости сиропа от теплоемкости чистой воды при практически одинаковых скоростях остывания обусловлено существенным отличием массы 50 мл сиропа от массы 50 мл воды.

## Задача 10.1. Мыльные пузыри (И.Иоголевич)

### Возможное решение

#### Часть 1.

Для получения зависимости  $V(t)$  будем надувать мыльные пузыри разного объема и измерять время их полного сдутия.

Для начала подготовим рабочее место. Чтобы пузыри дольше жили и имели форму полусферы, смочим пленку мыльным раствором. Чтобы не занимать руки, запустим секундомер и положим его на стол рядом с пленкой. Для надувания пузыря присоединим трубку к шприцу и наберем в шприц необходимый объем воздуха, затем обмакнем второй конец трубки в мыльный раствор. Выдувая весь воздух из шприца, сформируем на пленке пузырь. Дождавшись, когда секундомер будет показывать удобное для отсчета время, заппомним его и быстро отсоединим шприц от трубки. Дождемся полного сдувания пузыря, глядя при этом и на пузырь, и на секундомер. Запишем разность показаний секундомера в момент исчезновения пузыря и в начальный момент. Измерения выполним с шагом в 5 мл и для каждого объема пузыря проведем повторный опыт, затем усредним время.

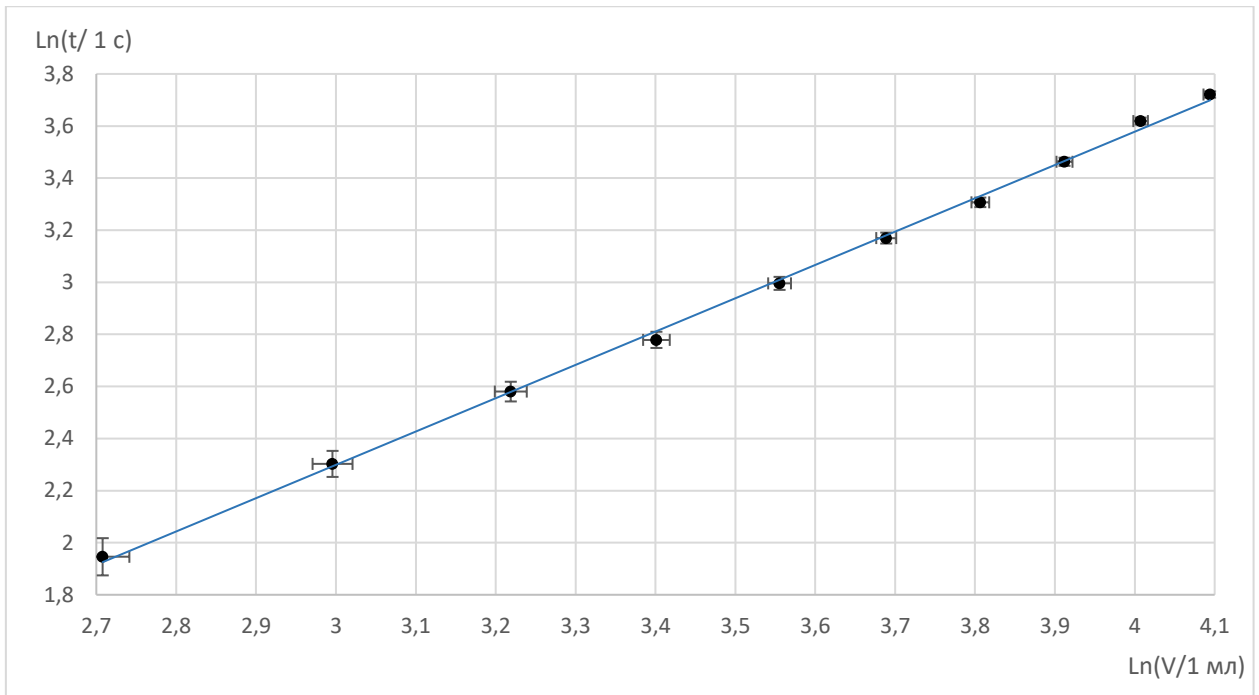
Заметим, что объем пузыря с большой точностью равен начальному объему воздуха в шприце, так как давление воздуха в пузыре отличается от атмосферного на единицы Паскалей. (Это можно подтвердить, получив значение  $B$  в конце эксперимента).

№	V, мл	t <sub>1</sub> , с	t <sub>2</sub> , с	t <sub>ср</sub> , с	ln(V/1 мл)	ln(t/1 с)
1	60	40,8	41,8	41,3	4,09	3,72
2	55	37,0	37,6	37,3	4,01	3,62
3	50	31,3	32,5	31,9	3,91	3,46
4	45	26,5	28,1	27,3	3,81	3,31
5	40	23,6	24,0	23,8	3,69	3,17
6	35	19,6	20,4	20,0	3,56	3,00
7	30	15,7	16,5	16,1	3,40	2,78
8	25	13,0	13,4	13,2	3,22	2,58
9	20	9,8	10,2	10,0	3,00	2,30
10	15	6,8	7,2	7,0	2,71	1,95

Для определения показателя степени  $n$  воспользуемся графиком в логарифмах:

$$\ln(t) = \ln(\alpha) + n \cdot \ln(V)$$

Построим график и по угловому коэффициенту определим  $n$ .



$$n = 1,28 \pm 0,04$$

Часть №2.

Для второй части работы нам требуется определить внутренний радиус трубки. Для этого наберем в шприц мыльный раствор и аккуратно выдавим в трубку 10 мл раствора так, чтобы не образовывались пузыри. С помощью миллиметровки измерим длину части трубки, заполненной мыльным раствором.

$$V_p = 10 \text{ мл}, L_p = 72,0 \text{ см}, r = \sqrt{\frac{V_p}{\pi L_p}} = (2,1 \pm 0,1) \text{ мм}$$

$$\varepsilon r = \frac{1}{2} (\varepsilon V_p + \varepsilon L_p) = \frac{1}{2} (0,1 + 0,01) = 0,06$$

Теперь нам необходимо определить мгновенный расход воздуха при объеме пузыря в 50 мл. Сразу отметим, что средний расход за все время сдувания пузыря объемом 50 мл не равен мгновенному. Наиболее точно можно определить мгновенный расход из теоретической зависимости  $t(V)$ . Рассмотрим время сдувания пузыря от объема  $V$  и от объема  $V+dV$ , где  $dV \ll V$ .

$$\begin{cases} t = \alpha V^n \\ t + dt = \alpha (V + dV)^n \end{cases}$$

$$dt = \alpha V^n \left( \left( 1 + \frac{dV}{V} \right)^n - 1 \right) = t \left( \left( 1 + \frac{dV}{V} \right)^n - 1 \right) = t \cdot n \frac{dV}{V} \Rightarrow Q_{\text{мгн}} = \frac{dV}{dt} = \frac{V}{tn}$$

Тогда мгновенный расход для пузыря объемом 50 мл  $Q = 1,22 \text{ см}^3/\text{с}$ .

Скорость воздуха в трубке  $v = \frac{Q}{\pi r^2}$ .

Число Рейнольдса  $Re = \frac{\rho Q}{\pi r \eta} = 12 \pm 2$ .

$$\varepsilon Re = \varepsilon \rho + \varepsilon V + \varepsilon t + \varepsilon n + \varepsilon r + \varepsilon \eta = 0,04 + 0,02 + 0,015 + 0,03 + 0,06 + 0,03 = 0,2$$



Можно сделать вывод, что течение воздуха является ламинарным.

Часть 3.

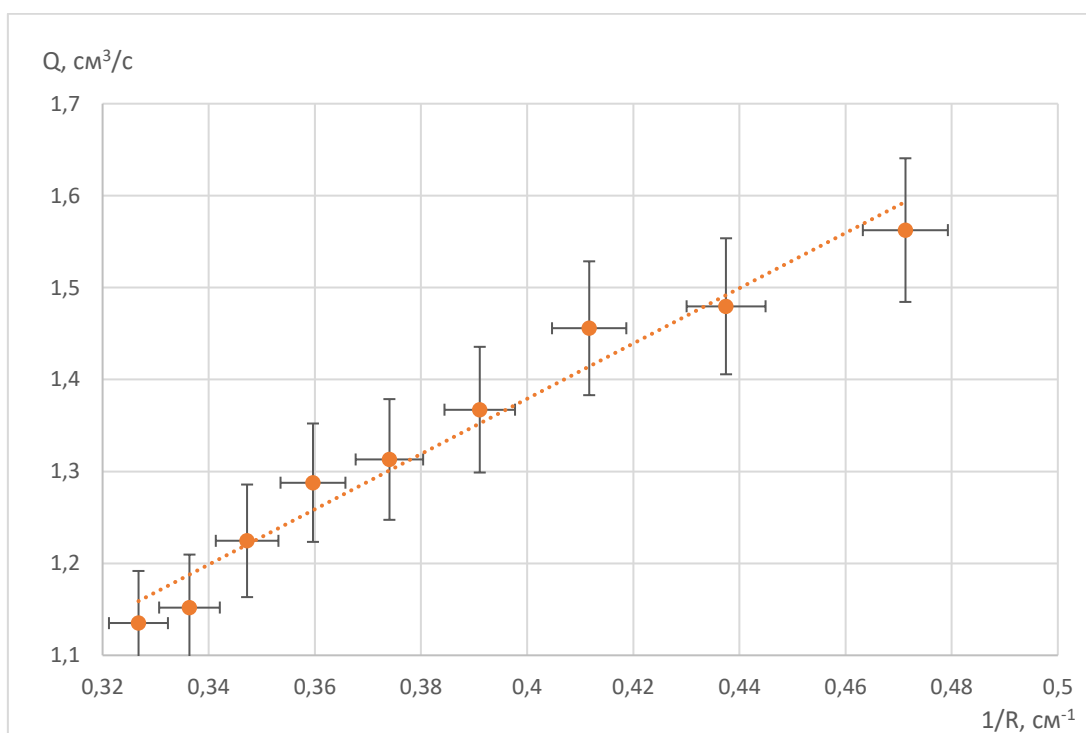
$$Q = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8 \eta l} = \frac{\pi r^4 \sigma}{2 \eta l R}$$

Длину трубки измерим с помощью миллиметровки  $l = (101 \pm 1)$  см.

Для более точного нахождения коэффициента поверхностного натяжения построим график  $Q(1/R)$ .

Радиус пузыря рассчитаем из его объема, считая пузырь полусферой. Рассмотрим силы, действующие на участок пузыря в месте соприкосновения с пластиковой пленкой. Так как поверхность пластика смочена мыльным раствором, то на участок пузыря со стороны мыльного раствора, расположенного внутри пузыря и снаружи, действуют одинаковые силы. Значит, поверхность пузыря перпендикулярна пластиковой пленке.

№	V, мл	1/R, см <sup>-1</sup>	Q, см <sup>3</sup> /с
1	60	0,327	1,13
2	55	0,336	1,15
3	50	0,347	1,22
4	45	0,360	1,29
5	40	0,374	1,31
6	35	0,391	1,37
7	30	0,412	1,46
8	25	0,437	1,48
9	20	0,471	1,56



Из графика определяем угловой коэффициент и по нему вычисляем  $\sigma = (18 \pm 6)$  мН/м.

$$\varepsilon\sigma = \varepsilon k + 4\varepsilon r = 0,33$$

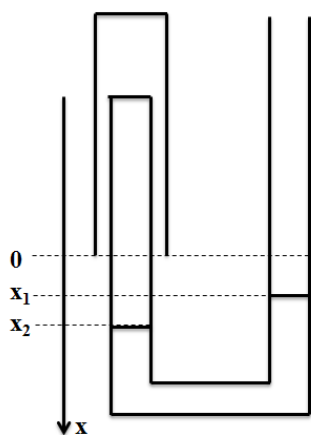
Более правильная оценка погрешности:  $\varepsilon\sigma = \sqrt{(\varepsilon k)^2 + (4\varepsilon r)^2} = 0,25$

### Критерии оценивания

№	Описание критерия	Балл
1	Количество измерений $t(V) \geq 5$ и измерения правдоподобны	1
2	Повторные измерения (не менее 2-х измерений для одного V) с последующим усреднением (для всех точек) - 1 балл. Если не для всех точек, то 0,5 балла	1 или 0,5
3	Объем пузыря измеряется шприцом	1
4*	Идея использования логарифма или угадал показатель степени 4/3 (с последующим подтверждением графиком)	1
	Качество построения графика (в логарифмах или от степени 4/3): оси+подписи, масштаб, точки, прямая	0,25*4
5	Результат для n (оценивается, если п.4 > 0 баллов или если n считается по 2-м точкам) (1,24 - 1,36) или (1,18 - 1,42)	2 или 1
6	Метод определения радиуса трубки через наливание (если диаметр измеряли миллиметровкой, то 0 баллов за весь пункт)	0,5
	Значение радиуса трубки (при хорошем методе) (0,16 - 0,26) см	0,5
7	Метод обработки для Q мгновенное	
	Через дифференцирование $t(V)$	2
	Через средний расход при $\Delta V = (3-5)$ мл или через касательные к графику $t(V)$	1
	Через средний расход при $\Delta V < 3$ мл или $\Delta V > 5$ мл	0
8	При использовании среднего расхода (за все время сдувания) вместо мгновенного расхода	0
8	Значение Re (7 - 22) (оценивается, если п. 7 > 0)	1
9	Погрешность Re около 20% (оценивается, если п. 7 > 0)	0,5
10	Метод получения сигма	
	По графику мгновенного расхода (посчитанного через производную) от 1/R или по 1 точке через интегрирование	2
	По одной точке по данным из п. 2 или по графику со средними расходами	1
	При использовании среднего расхода (за все время сдувания) вместо мгновенного расхода	0
11	Значение сигма (оценивается, если п. 10 > 0) (14 - 26) мН/м или (8-32) мН/м	1 или 0,5
12	Погрешность сигма около 40% (оценивается, если п. 10 > 0)	0,5

\* Если показатель степени n определялся по двум точкам, то за пункт 4 ставилось 0 баллов. Если вычислялся набор значений n по различным парам точек с последующим усреднением, то п. 4 - 1 балл.

### Задача 10.2. Вода и воздух (И. Воробьев)



Введем ось координат  $x$  так, как показано на рисунке (нулевое значение  $x$  на краю оболочки). Обозначим  $x_{10}$  и  $x_{20}$  начальные координаты поверхности воды в правом и левом сосудах соответственно. Будем доливать воду в правое колено и следить за изменением уровня воды в правом и левом коленах, т.е. координат  $x_1$  и  $x_2$ . Тогда из закона Бойля-Марриотта получаем, что  $H(p_0 + \rho g(x_{20} - x_{10})) = (H - (x_{20} - x_2))(p_0 + \rho g(x_2 - x_1))$ , откуда

$$\frac{\rho g H}{p_0} = \frac{\Delta x_2}{\Delta x_1 - \Delta x_2} \left( 1 + \frac{\rho g(x_2 - x_1)}{p_0} \right), \quad (1)$$

где  $\Delta x_1 = x_{10} - x_1$ , а  $\Delta x_2 = x_{20} - x_2$ . В табл. 1 представлены

результаты измерений.

№	$x_1$ , см	$x_2$ , см	$\Delta x_1$ , см	$\Delta x_2$ , см	$\Delta x_1 - \Delta x_2$ , см	$\Delta x_2 / (\Delta x_1 - \Delta x_2)$
0	34.4	33				
1	27.6	31.8	6.8	1.2	5.6	0.21428571
2	21.5	31.3	12.9	1.7	11.2	0.15178571
3	15.5	30.6	18.9	2.4	16.5	0.14545455
4	7.9	29.9	26.5	3.1	23.4	0.13247863
5	-0.5	29.3	34.9	3.7	31.2	0.11858974
6	-8	28.6	42.4	4.4	38	0.11578947
7	-15.9	27.8	50.3	5.2	45.1	0.11529933
8	-24.1	27.1	58.5	5.9	52.6	0.1121673
9	-32	26.4	66.4	6.6	59.8	0.11036789
10	-40.1	25.7	74.5	7.3	67.2	0.10863095
11	-48	25	82.4	8	74.4	0.10752688
12	-56.3	24.3	90.7	8.7	82	0.10609756
13	-64.2	23.7	98.6	9.3	89.3	0.10414334
14	-72.2	23.1	106.6	9.9	96.7	0.10237849
15	-79.6	22.5	114	10.5	103.5	0.10144928
16	-87.9	21.8	122.3	11.2	111.1	0.10081008

Проанализируем уравнение (1). В левой части равенства стоит постоянная величина  $\frac{\rho g H}{p_0}$ .

При малом значении  $x_2 - x_1$  второе слагаемое в скобках много меньше единицы и  $\frac{\rho g H}{p_0} = \frac{\Delta x_2}{\Delta x_1 - \Delta x_2}$ . Выберем такие измерения, при которых  $\frac{\Delta x_2}{\Delta x_1 - \Delta x_2}$  остается постоянной, при этом так, чтобы относительная погрешность измерения расстояний была как можно меньше. Усредняя результаты измерений 5-9 получаем, что  $\frac{\rho g H}{p_0} = 0,11$ . Основной вклад в погрешность дает  $\frac{\rho g(x_2 - x_1)}{p_0} < 5 \cdot 10^{-2}$ , т.е. относительная погрешность примерно равна 3%.

Для измерения атмосферного давления проведем следующий эксперимент. Закачаем в тонкую трубку, расположенную горизонтально, некоторое количество воды так, чтобы она заполнила трубку от одного конца до середины. Измерим длину воздушного столбика  $h_0$ . Заткнем другой конец трубки пальцем и расположим трубку вертикально водяным столбиком вниз. В этом случае объем воздуха увеличится и из закона Бойля-Марриотта мы получаем, что

$$p_0 = \rho g l \frac{h}{h - h_0},$$

где  $l$  - высота столбика воды, а  $h$  высота воздушного столбика в вертикальном положении. Проводя несколько измерений и усредняя их мы получаем, что атмосферное давление воды равно  $1020 \pm 50$  см. вод. ст. Основную погрешность вносит измерение  $h - h_0 = 2$  см, при инструментальной погрешности 1 мм.

Из предыдущих двух пунктов можно получить, что  $L = H - x =$  равна  $79 \pm 4$  см.

<b>Измерение <math>H/p_0</math></b>		
1	Теория. Получена формула через измеримые величины, позволяющая найти $H/p_0$ и описана методика проведения эксперимента.	1,5
2	Сделано приближение, позволяющее получить линейную зависимость	1
3	Таблица измерений Число точек: $\geq 5$ точек – 1 балл 3–4 точки – 0,5 балла Диапазон точек: Диапазон $x_2$ больше 5 см – 1 балл Диапазон $x_2$ больше 3 см – 0,5 балла	2
4	Обработка: усреднение или график	1
5	Результат $\frac{H}{p_0} = \frac{L+x}{p_0}$ , где $L$ – данные каждой установки из таблицы, $x$ – данные из работы, $p_0 = 1027$ см.в.ст. Попадает в 10% - 1 балл Попадает в 20% - 0,5 балла	1
6	Погрешность	1
<b>Нахождение атмосферного давления</b>		
7	Теория. Описан метод измерения, получена формула через измеримые величины. Предложен метод с погрешностью сопоставимой с авторским решением – 1, 5 балла. <i>Если давление находится из решения системы уравнений п.1 – 0,5 балла (в этом случае п. 8, 9, 10 – 0 баллов)</i>	1,5
8	Измерения. Число измерений $\geq 3$ – 1 балл 1-2 измерения – 0,5 балла Измерения дают погрешность 10% - 1 балл измерения дают погрешность 20% - 0,5 балла	2
9	Обработка: усреднение или график	1

10	Результат $p_0 = 1027$ см. в. ст. Попадание в 10% - 1 балл Попадание в 20% - 0,5 балла	1
11	Погрешность	1
<b>Нахождение длины <math>L</math></b>		
12	Результат $L$ попадает в ворота 10%	0, 5
13	Погрешность	0, 5

*Если нет верного ответа на 1 или 2 пункт задачи, то 3 пункт задачи не оценивается*

*Если не записан номер установки или не указано значение  $x$ , то пп. 5 и 12 не оцениваются*

### Задание 11.1. Температура Кюри

#### Введение

Атомы и молекулы веществ, относящихся к парамагнетикам и к ферромагнетикам, имеют собственные магнитные моменты. При низких температурах в ферромагнетиках за счет взаимодействия соседних атомов возникают области объема, называемые доменами, в которых магнитные моменты атомов одинаково направлены. Если в предмете из ферромагнитного вещества большая часть доменов имеет примерно одинаковое направление намагниченности, вокруг таких предметов возникает сильное магнитное поле. Это постоянные магниты. При повышении температуры тепловое движение разрушает упорядоченность магнитных моментов, и ферромагнетик превращается в парамагнетик. В парамагнетиках домены отсутствуют, моменты атомов ведут себя независимо друг от друга. Температура, соответствующая этому переходу, называется температурой Кюри. Магнит, нагретый до температуры Кюри, необратимо теряет свои свойства. Выше температуры Кюри ферромагнетик находится в парамагнитном состоянии и может проявлять магнитные свойства только во внешнем магнитном поле. Значение магнитного момента  $p_m$  парамагнитного образца определяется формулой:

$$p_m = \chi V B$$

где  $\chi$  – магнитная восприимчивость,  $V$  – объем образца,  $B$  – величина внешнего магнитного поля. Магнитная восприимчивость зависит от абсолютной температуры  $T$  в соответствии с законом Кюри-Вейса:

$$\chi = \frac{c}{T - T_c}$$

где  $T_c$  – температура Кюри. Когда парамагнитный образец находится в неоднородном внешнем поле, на него действует сила, втягивающая его в область более сильного поля. Величина этой силы пропорциональна магнитному моменту  $p_m$ .

**LI Всероссийская олимпиада школьников по физике**  
**Экспериментальный тур.**

**Часть 1. Температура Кюри неодимового магнита**

При достижении температуры Кюри  $T_c$  постоянный магнит размагничивается. Ваша задача по возможности точно определить температуру Кюри.

1. Продумайте и подробно опишите метод измерений, по возможности сопроводив описание рисунком.
2. Проведите измерения, используя выданные вам маленькие неодимовые магниты.
3. Оцените погрешность определения  $T_c$  маленьких неодимовых магнитов.

***Оборудование для части 1 задания 1***

- 1) 10 маленьких неодимовых магнитов
- 2) Свеча
- 3) Перчатка
- 4) Мультиметр с термопарой
- 5) Кусок алюминиевой фольги
- 6) Зажим «крокодил» из стали

Внимание! Вам запрещается самостоятельно не только зажигать, но и тушить свечу. Это могут делать только дежурные по аудитории.

Внимание! Не помещайте спай термопары непосредственно в пламя свечи!

Новые термопары не выдаются.

Подсказка. Надежные показания термопары могут быть получены лишь при обеспечении ее хорошего теплового контакта с предметом, температура которого измеряется.

LII Всероссийская олимпиада школьников по физике  
Экспериментальный тур.

**Часть 2. Температура Кюри гадолиния**

При температуре ниже температуры  $T_c$  гадолиний является ферромагнетиком, при  $T > T_c$  это парамагнетик. Вам предлагается исследовать зависимость магнитной восприимчивости гадолиния от температуры вблизи точки Кюри.

4. Исследуйте зависимость магнитной восприимчивости  $\chi$  гадолиния (в условных единицах) от температуры в диапазоне от комнатной температуры до  $50\text{ }^\circ\text{C}$ . В каком диапазоне температур выполняется закон Кюри-Вейса?
5. Определите, используя полученные вами результаты, температуру Кюри для гадолиния.
6. Определите погрешность измерения  $T_c$ .

**Оборудование для части 2 задания 1**

- 1) Большой цилиндрический магнит на деревянной подставке (нагревать его запрещается)
- 2) Образец гадолиния
- 3) Весы (чтобы весы не отключались, каждые 20 секунд нажимайте на кнопку *Light*)
- 4) Подставка из немагнитного металла с отверстием
- 5) Горячая и холодная вода (по требованию), емкость для воды
- 6) Мультиметр с термопарой
- 7) Прищепка
- 8) Миллиметровка



LII Всероссийская олимпиада школьников по физике  
Экспериментальный тур.

### Задание 11.2. Двухлучепреломление в скотче

#### Введение

Электромагнитная волна называется плоскополяризованной, если вектор  $E$  совершает колебания в одной плоскости. Эта плоскость называется плоскостью поляризации, а направление, параллельно которому колеблется вектор  $E$ , называется направлением поляризации. Естественный свет содержит все возможные направления поляризации. Поляризатор - это устройство, которое пропускает через себя свет только одного направления поляризации, и поглощает волны с перпендикулярным направлением поляризации. Направление поляризации света, прошедшего через поляризатор, будем называть «разрешенным» направлением этого поляризатора.

Среди прозрачных оптических сред можно выделить изотропные среды, показатель преломления которых не зависит от направления поляризации световой волны, а также анизотропные, свойства которых различны для разных направлений поляризации света. В данной задаче мы будем исследовать такую анизотропную среду - пленку «скотч».

Введем систему координат, указанную на рисунке. Обозначим символами  $n_x$  и  $n_y$  - показатели преломления для световой волны, идущей вдоль оси  $Oz$  и поляризованной вдоль осей  $Ox$ ,  $Oy$  соответственно. Также обозначим  $\Delta n = n_x - n_y$ .

Показатели преломления  $n_x$  и  $n_y$  изменяются при растяжении пленки. В процессе производства после стадии кристаллизации из расплава пленка является изотропной. После затвердевания пленку растягивают сложным образом, поэтому у выданной вам пленки  $\Delta n < 0$ .

Для изучения пленки вы будете растягивать ее вдоль оси  $Ox$ . Введем

обозначение для относительного удлинения  $\varepsilon = \frac{\Delta x}{x_{\text{нач}}}$ .

**ЛII Всероссийская олимпиада школьников по физике**  
**Экспериментальный тур.**

**Оборудование:**

1. Катушка пленки «скотч».
2. Система для растяжения пленки.
3. Ножницы.
4. Фломастер.
5. Два поляризатора на подставках. Поляризаторы закреплены в держателях так, что их разрешенные направления образуют угол  $45^0$  с вертикалью.
6. Лазерная указка на подставке.
7. Линейка.
8. Картон для зажима пленки.
9. Фотодиод и мультиметр.
10. Миллиметровая бумага для построения графика.

**Задание:**

1. Закрепите в установке полоску пленки горизонтально, зажмите ее как показано на рисунке.

Вращая ручку установки, добейтесь того, чтобы пленка полностью выпрямилась (не провисала).

По разные стороны от полоски параллельно ей расположите два поляризатора. Их разрешенные направления должны быть взаимно перпендикулярны и составлять угол  $45^0$  с вертикалью.

Растягивайте пленку и наблюдайте (невооруженным глазом) сквозь два поляризатора и пленку рассеянный белый свет. Растягивайте пленку до  $\varepsilon = 1$  и далее до разрыва. Опишите наблюдаемые эффекты (изменение цвета и интенсивности света, прошедшего через систему) в зависимости от удлинения  $\varepsilon$  пленки.

2. Закрепите в установке новую полоску пленки, как в пункте 1. Считая, что плотность пленки при растяжении остается постоянной, исследуйте зависимость толщины  $d$  пленки от относительного удлинения  $\varepsilon$ . Толщина

**ЛП Всероссийская олимпиада школьников по физике**  
**Экспериментальный тур.**

выданной вам (нерастянутой) пленки  $d_0 = 25$  мкм . Проведите измерения для 5 различных значений  $\varepsilon$  .

В следующих пунктах считайте толщину плёнки постоянной и равной  $d_0$ .

3. Соберите установку как указано в пункте 1. Закрепите в зажиме новую полоску пленки. Направьте луч лазера сквозь пленку и два поляризатора, и измерьте зависимость интенсивности  $I$  прошедшего света (в условных единицах) от относительного удлинения  $\varepsilon$  пленки. (Внимание!! Свет лазера поляризован). Для измерения интенсивности света используйте фотодиод, подключенный к мультиметру в режиме амперметра.

4. После прохождения электромагнитной волны через полоску пленки между ее составляющими, поляризованными вдоль осей  $Ox$  и  $Oy$ , возникает дополнительная разность фаз

$$\Delta\varphi = 2\pi d \frac{\Delta n}{\lambda}.$$

При этом интенсивность прошедшего света равна

$$I = I_0 \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right).$$

Зависимость, снятая в пункте 3, имеет несколько минимумов. Определите, какой из них соответствует  $\Delta\varphi = 0$  . Ответ обоснуйте.

5. Используя полученные ранее данные, постройте график зависимости  $\Delta n(\varepsilon)$ . Считая, что разность показателей преломления  $\Delta n$  линейно зависит от удлинения пленки  $\varepsilon$  :  $\Delta n(\varepsilon) = A\varepsilon - B$ , определите коэффициенты  $A$  и  $B$ .

Указания:

1. Длина волны лазера  $\lambda = 650$  нм .
2. Считайте что  $\Delta n \ll 1$  при любой деформации пленки.
3. Сила тока, протекающего через амперметр, прямо пропорционален мощности падающего на фотодиод света.

### Задача 11-Е1. Температура Кюри неодимового магнита.

Чтобы измерить температуру Кюри неодимового магнита, соберем установку, как показано на Рис. 1. Обмотаем термопару фольгой, чтобы обеспечить хороший тепловой контакт, и заждем крокодилом.



Рис. 1. Схема установки для измерения температуры Кюри неодимового магнита.

Прикрепим маленький неодимовый магнит к крокодилу вблизи спая термопары. Будем нагревать крокодил свечой с противоположной стороны, чтобы нагрев происходил достаточно медленно и температура успевала установиться. При достижении температуры Кюри магнит размагнитится, перестанет притягиваться к крокодилу и упадет. Повторим эксперимент несколько раз, чтобы определить температуру Кюри с большей точностью. В таблице приведены значения температуры, измеренные на трёх разных экспериментальных установках.

	Установка 1	Установка 2	Установка 3
Эксперимент 1	245	270	247
Эксперимент 2	260	250	255
Эксперимент 3	250	246	240
Эксперимент 4	252	255	254
Эксперимент 5	258	260	262
$T_C$	253	256	252
$\Delta T_C$	3	4	4

$T_C$  рассчитывается как среднее арифметическое,  $\Delta T_C$  по формуле для случайной погрешности

$$\Delta T_C = \sqrt{\frac{\sum_i (T_i - T_C)^2}{N(N-1)}}$$

где  $N$  – количество измерений.

С учетом всех проведенных экспериментов,  $T_C = 253 \pm 2^\circ\text{C}$

### Задание 2. Температура Кюри гадолиния.

Закон Кюри-Вейса:

$$\chi = \frac{C}{T - T_C}$$

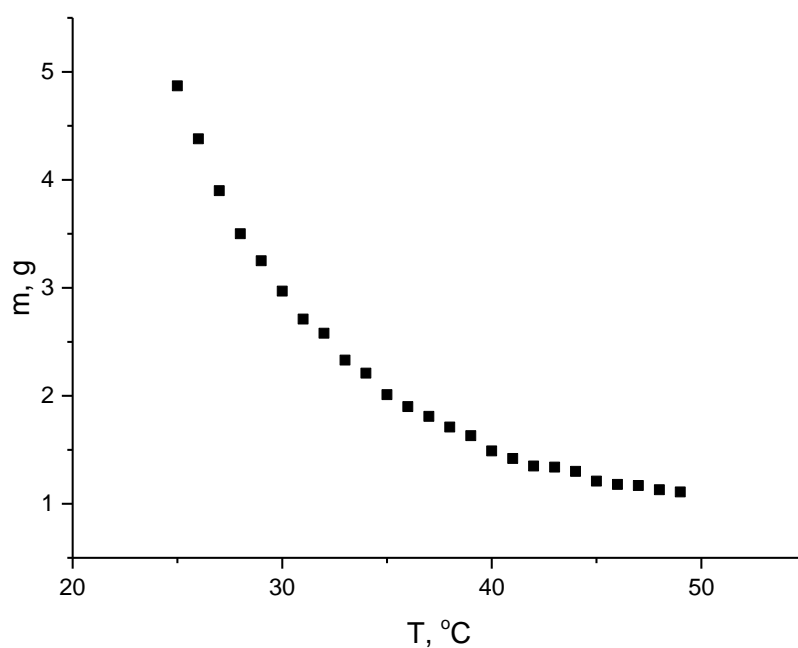
Так как  $p_m \propto \chi$  и сила  $F$ , действующая на образец гадолиния в магнитном поле, пропорциональна  $p_m$ , то  $F \propto \frac{1}{T - T_C}$ .

Соберём установку, как показано на Рис. 2. Большой неодимовый магнит, прикрепленный к подставке, положим на весы. Предварительно тарировав весы, поместим над магнитом алюминиевую подставку с отверстием и поставим на неё сосуд с образцом гадолиния на дне. Зальем немного горячей воды и будем опускать её температуру до комнатной, добавляя холодную воду. Температуру воду будем изменять термопарой, закрепив провод прищепкой на краю стакана. Масса, показываемая весами, пропорциональна силе, действующей на образец гадолиния.

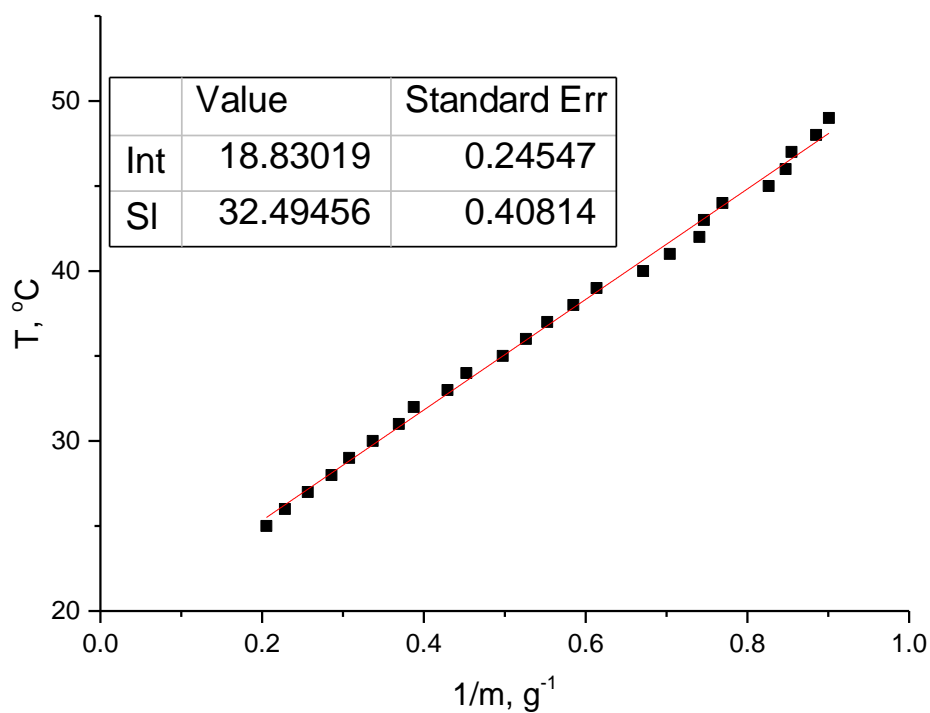


Рис. 2. Фотография экспериментальной установки для выполнения задания 2.

Измеренная зависимость массы, показываемой весами, от температуры воды показана на графике.



Чтобы определить, в каком диапазоне выполняется закон Кюри-Вейса и вычислить температуру Кюри, нужно построить график зависимости  $1/m$  от  $T$ .



Отклонения от закона Кюри-Вейча нельзя признать существенными во всем измеренном диапазоне температур. Температура Кюри соответствует пересечению с осью температуры. Используя МНК, получаем

$$T_C = 18.8 \pm 0.2^\circ\text{C}$$

## Задача 11-Е2. Двулучепреломление в скотче

1. Разрешенные направления поляризаторов образуют угол 45 градусов с горизонталью. Это позволяет расположить поляризаторы так, чтобы их разрешенные направления были параллельны или перпендикулярны. Закрепим полоску скотча в установке для растяжения, поместим между скрещенными поляризаторами, будем растягивать и наблюдать глазом. При растяжении скотча мы видим изменение интенсивности и цвета (Рис. 1).



*Рис. 1. Наблюдение глазом скотча, растянутого между скрещенными поляризаторами.*

Нерастянутый скотч выглядит желтым. При растяжении примерно в 1,5 раза наблюдается минимум интенсивности, никакие длины волн не проходят. При дальнейшем растяжении мы наблюдаем изменение светов: желтый, красный, синий, зелёный. Для получения максимального балла за этот пункт, участники должны были заметить 2 особенности: 1) при некотором растяжении свет не проходит 2) при дальнейшем растяжении наблюдается изменение цвета. Заметив эти особенности, можно ответить на вопрос пункта 4.



*Рис. 2. Наблюдение глазом скотча между скрещенными поляризаторами при последовательном растяжении.*

2. Будем растягивать скотч и измерять длину и ширину. Чтобы на измерения не влияла ближайшая к зажиму область, нарисуем на скотче фломастером две полосы и будем измерять расстояние между ними. Ширину скотча измеряем в середине растягиваемой полоски. Измеренные данные приведены в таблице. Толщина скотча рассчитана в предположении, что плотность скотча постоянна.

Длина $L$ скотча, мм	Погрешность длины, мм	Ширина $h$ скотча, мм	Погрешность ширины, мм	Толщина $d$ скотча, мкм	Погрешность толщины, мкм
48	2	19	0,5	25,0	0
59	2	16,5	0,5	23,4	1,2
67	2	14,5	0,5	23,5	1,1
75	3	13	0,5	23,4	1,1
81	3	12	0,5	23,5	1,3
89	3	10,5	0,5	24,4	1,4

Погрешность толщины определяется по формуле:

$$\frac{\Delta d}{d} = \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2}$$

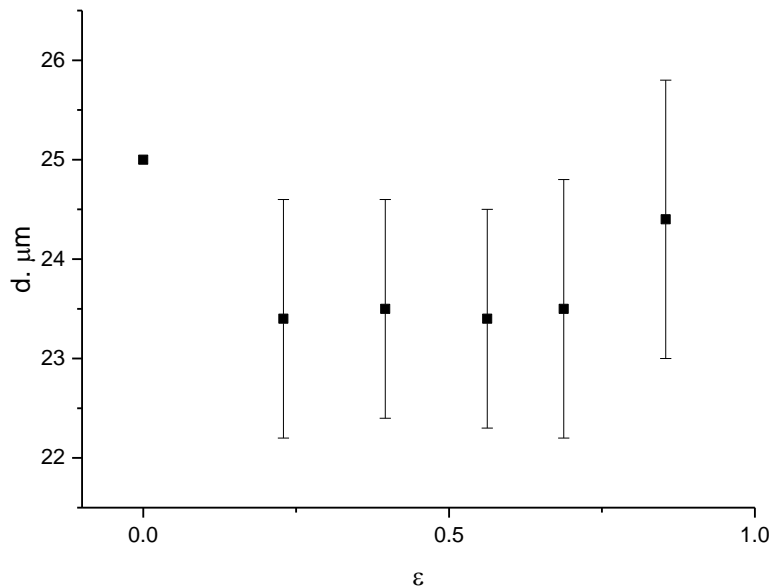


Рис. 2. График зависимости толщины скотча от его относительного удлинения.

Изменение толщины скотча при растяжении лежит в пределах погрешности измерений. В следующих пунктах будем считать, что толщина постоянна (такое указание дано в условии).



3. Расположим новую полоску скотча между скрещенными поляризаторами, будем светить лазером и измерять фотодиодом интенсивность прошедшего света. Собранный установка показана на фотографии (Рис. 3).

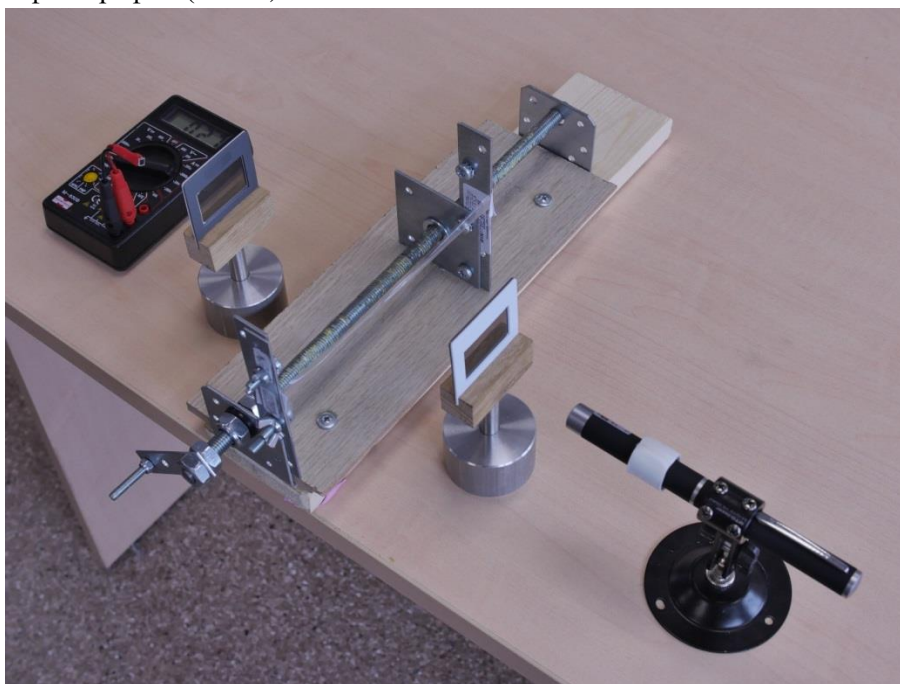


Рис. 3 Фотография установки для измерения интенсивности света лазера, прошедшего через скотч, расположенный между скрещенными поляризаторами.

Измеренная зависимость интенсивности прошедшего света от относительно удлинения полоски скотча показана на графике (Рис. 4). На измеренной зависимости видны два максимума и два минимума интенсивности.

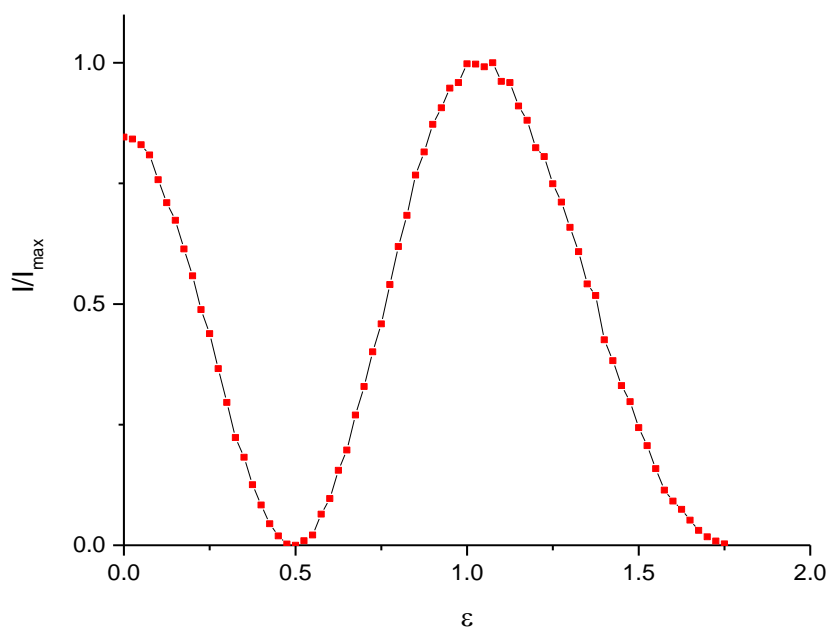


Рис. 4. Полоска скотча располагается между скрещенными поляризаторами и растягивается. На графике показана зависимость интенсивности прошедшего света красного лазера от относительного удлинения полоски скотча.

4. Вспомним, что мы видели глазом во время выполнения задания пункта 1, когда растягивали скотч, расположенный между скрещенными поляризаторами, и сопоставим эти наблюдения с лазерными измерениями, проведенными во время выполнения задания пункта 3. В первом минимуме глазом мы видим темноту, а во втором – изменение цвета. Первый минимум является минимумом для всех длин волн, а второй только для красного цвета, минимумы для других длин волн появляются при других растяжениях. Дополнительная разность фаз, появляющаяся при прохождении скотча между волнами с разной поляризацией, зависит от длины волны в соответствии с формулой

$$\Delta\varphi = 2\pi d \frac{\Delta n}{\lambda}$$

Положение минимума не зависит от длины волны, только если  $\Delta\varphi = 0$ . Следовательно,  $\Delta\varphi = 0$  при растяжении, соответствующем первому минимуму.

5. Чтобы получить зависимость  $\Delta n$  от  $\varepsilon$ , нужно использовать зависимость интенсивности пропускания от растяжения для красного лазера, измеренную в пункте 3. Из условия  $I = I_0 \sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2}$  разность фаз находится неоднозначно, нужно правильно выбрать корень на каждом участке. Учтем, что первый минимум соответствует разности фаз  $\Delta\varphi = 0$ . Зависимость разности фаз от относительного растяжения показана на Рис. 5.

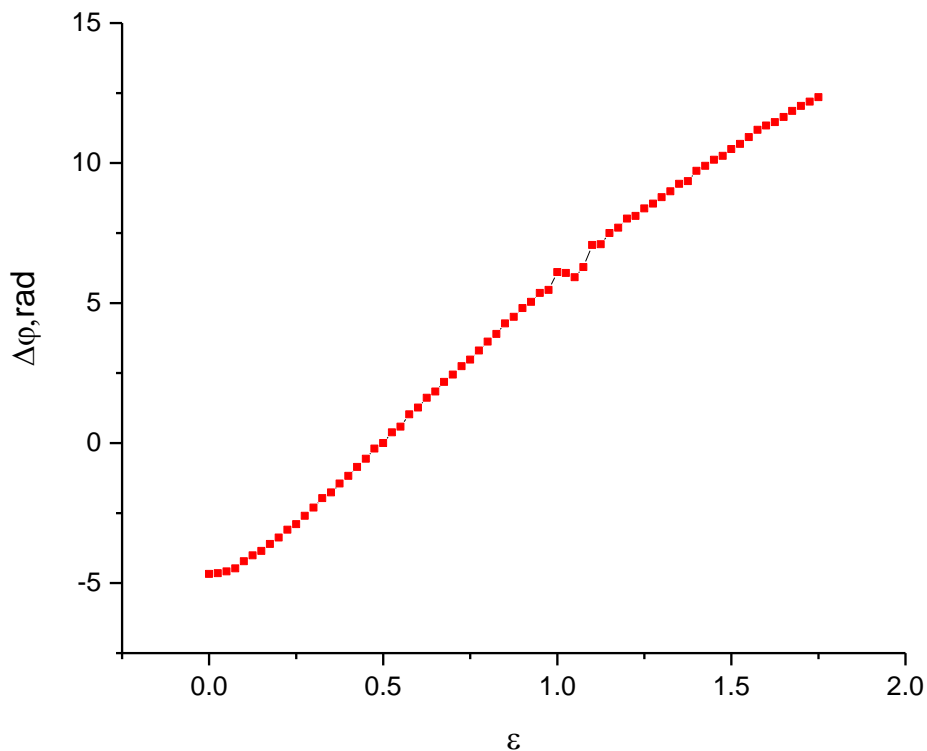


Рис. 5. Зависимость разности фаз  $\Delta\varphi$  между волнами разных поляризаций от относительного удлинения  $\varepsilon$  скотча.

Отсюда получаем зависимость  $\Delta n$  от  $\varepsilon$ , используя формулу, связывающую  $\Delta n$  и  $\Delta\varphi$ , данную в условии. График зависимости  $\Delta n$  от  $\varepsilon$  показан на Рис. 6.  $A = 0.023$ ,  $B = 0.011$

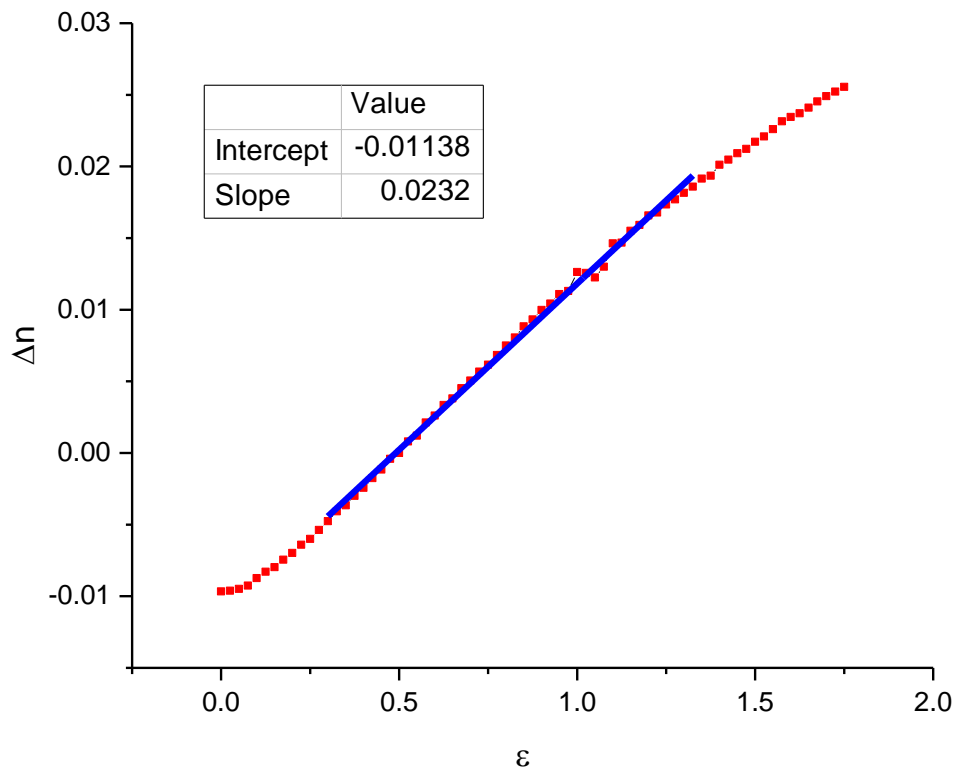


Рис. 6. Зависимость разности показателей преломления  $\Delta n$  от относительно удлинения скотча  $\varepsilon$ .

Идея этой задачи была предложена Виталием Костаревым. Разработкой этой задачи занимались Виталий Костарев, Алексей Ноян и Александр Киселев.

Если вы хотите обсудить копирование этой задачи целиком или отдельных частей экспериментальной установки, я буду рад ответить на ваши вопросы (noyan@phystech.edu).

## Критерии оценивания экспериментальных заданий

### Задание 11.1. Температура Кюри

- 1) Нагревание магнита до тех пор, пока он не потеряет магнитные свойства, с отслеживанием его температуры в этом процессе  
(проверка магнитных свойств постфактум – 0,5 балла) 1,5 балла
- 2) Обеспечение надежности измерения температуры, включая использование фольги для выравнивания температуры магнита и термопары, а также косвенный нагрев магнита (обеспечение только одного из этих двух условий — 0,5 балла) 1,5 балла
- 3) Сделано не менее 7 измерений 1,5 балла  
(5-6 точек – 1 балл; 3-4 точки – 0,5 балла)
- 4) Результат в диапазоне 235-265 °С (508-538 К) 2 балла  
(225-270 °С — 1,5 балла) (498-543 К)  
(210-275 °С — 1 балл) (483-548 К)  
(200-280 °С — 0,5 балла) (473-553 К)
- 5) Расчёт погрешности 0,5 балла
- 6) Методика измерения магнитной восприимчивости гадолиния 1 балл
- 7) Сделано не менее 7 измерений 1,5 балла  
(5-6 точек — 0,8 балла)
- 8) Линеаризация  $1/F(T)$  и график, сделан вывод о применимости закона Кюри-Вейса 2 балла  
(алгебраический вывод — 0,5 балла)
- 9) Оформление графика 0,5 балла
- 10) Определена  $T_c$  гадолиния из графика 1 балл  
(определена алгебраически — 0,5 балла)
- 11) Результат в диапазоне 16-20 °С (289-293 К) 1,5 балла  
(14-22 °С — 1 балл) (287-295 К)  
(12-24 °С — 0,5 балла) (285-297 К)
- 12) Расчёт погрешности  $T_c$  0,5 балла

## Задание 11.2. Двухлучепреломление в скотче

1.1	Описано изменение цвета в зависимости от $\varepsilon$ (если изменение $\varepsilon < 1$ , ставится 0,3)	0,5 балла
1.2	Описано изменение интенсивности в зависимости от $\varepsilon$ (если изменение $\varepsilon < 1$ , ставится 0,3)	0,5 балла
2.1	Идея измерения ширины скотча	0,6 баллов
2.2	Идея измерения однородного по ширине участка	0,4 балла
2.3	Точки. Если $\geq 5$ точек	1 балл
	Если $< 5$ точек	0 баллов
2.4	График: точки	0,3 балла
	оси	0,1 балла
	масштаб	0,1 балла
	единицы измерения	0,1 балла
	погрешности	0,4 балла
3.1	Указаны условные единицы для $I$	0,1 балла
3.2	Диапазон изменения $\varepsilon$ : $\varepsilon < 0,5$	0,0 баллов
	$0,5 \leq \varepsilon < 1,0$	0,5 баллов
	$1,0 \leq \varepsilon$	1,0 балл
3.3	Точки ( $k$ ): $k < 10$	0,0 баллов
	$10 \leq k < 15$	1,0 балл
	$15 \leq k < 20$	1,5 балл
	$20 \leq k$	2,0 балл
3.4	Проведено исследование экстремумов	0,4 балла
3.5	Экстремумы: указан 1 экстремум	0,5 балла
	указан 2 экстремума	1,0 балл
	указан 3 экстремума	1,5 балл
4.1	Правильный ответ при наличии частично правильного решения (есть рассуждения об отсутствии зависимости $\Delta\varphi$ от $\lambda$ , со ссылкой на пункт 1)	1,0 балл
	правильный ответ и правильные рассуждения	2,0 балла
5.1	Таблица $\Delta n(\varepsilon)$	0,3 балла

5.2	График: точки		0,4 балла
	оси		0,1 балла
	масштаб		0,1 балла
	единицы измерения		0,1 балла
5.3	Обработка по точкам ( $k$ ):	$2 \geq k$	0,3 балла
		$5 \geq k > 2$	0,5 баллов
		$k > 5$	1,0 балл
5.4	Значение $0,005 \leq A \leq 0,030$		0,5 балла
	Значение $0,003 \leq B \leq 0,015$		0,5 балла