

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
ΔT_C	3	4	4

T_C рассчитывается как среднее арифметическое, ΔT_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:

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

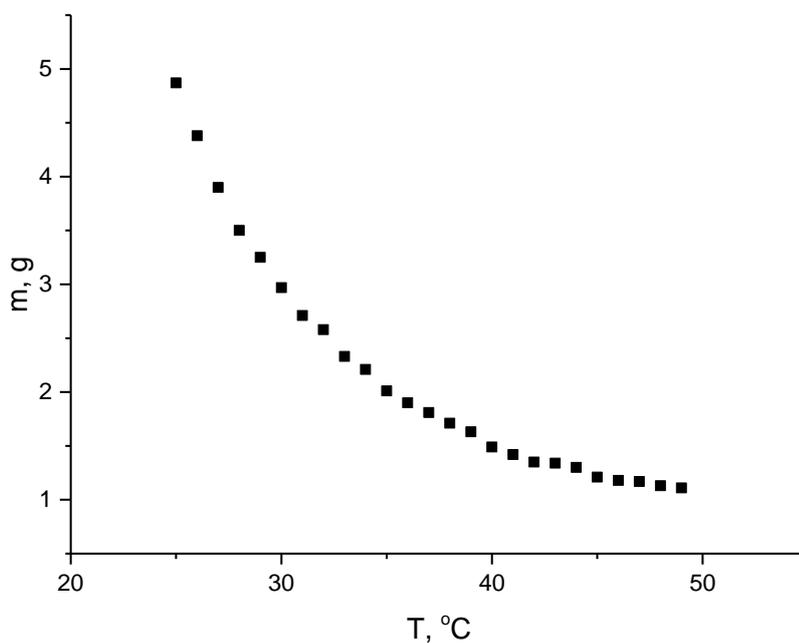
Так как $p_m \propto \chi$ и сила F , действующая на образец гадолиния в магнитном поле, пропорциональна p_m , то $F \propto \frac{1}{T - T_C}$.

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.

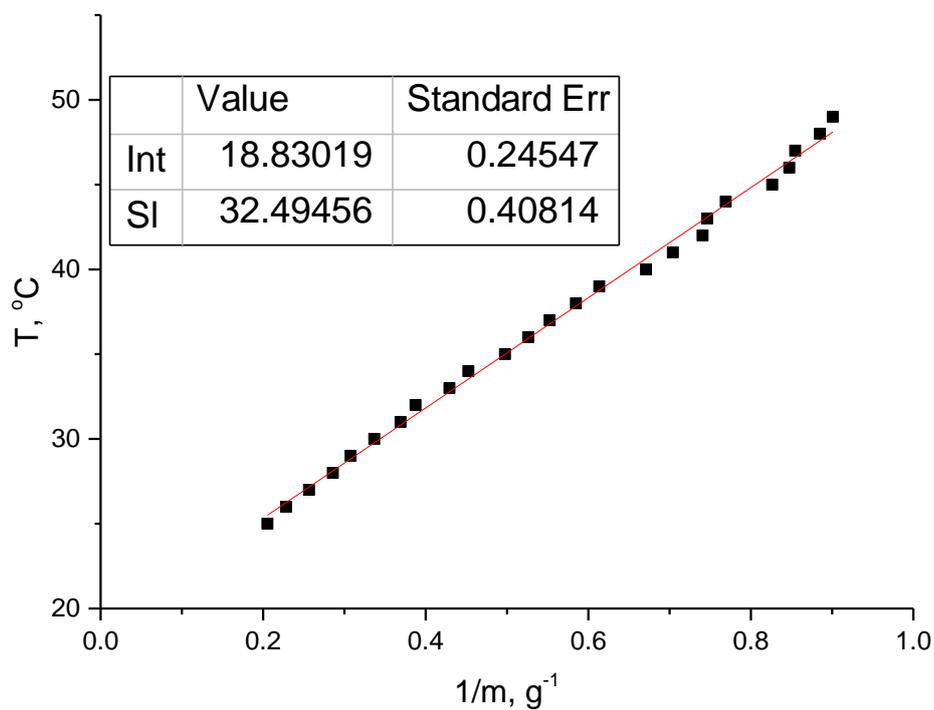


Рис. 2. Фотография экспериментальной установки для выполнения задания 2.

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:

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

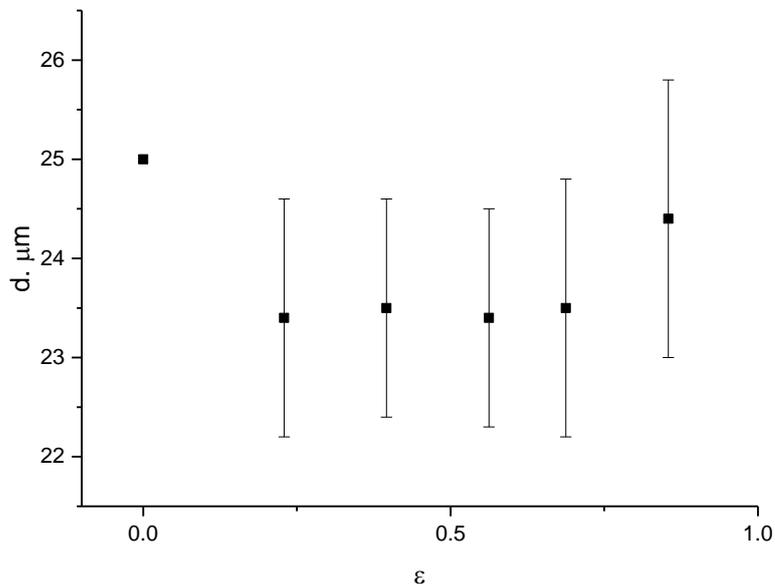


Рис. 2. График зависимости толщины скотча от его относительного удлинения.

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. Собранная установка показана на фотографии (Рис. 3).

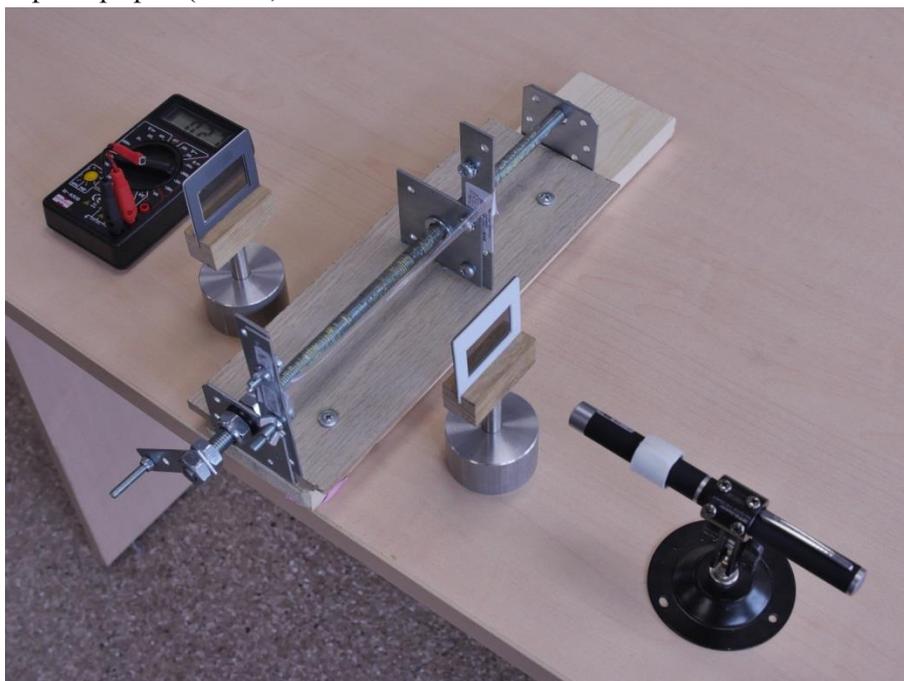


Рис. 3 Фотография установки для измерения интенсивности света лазера, прошедшего через скотч, расположенный между скрещенными поляризаторами.

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.

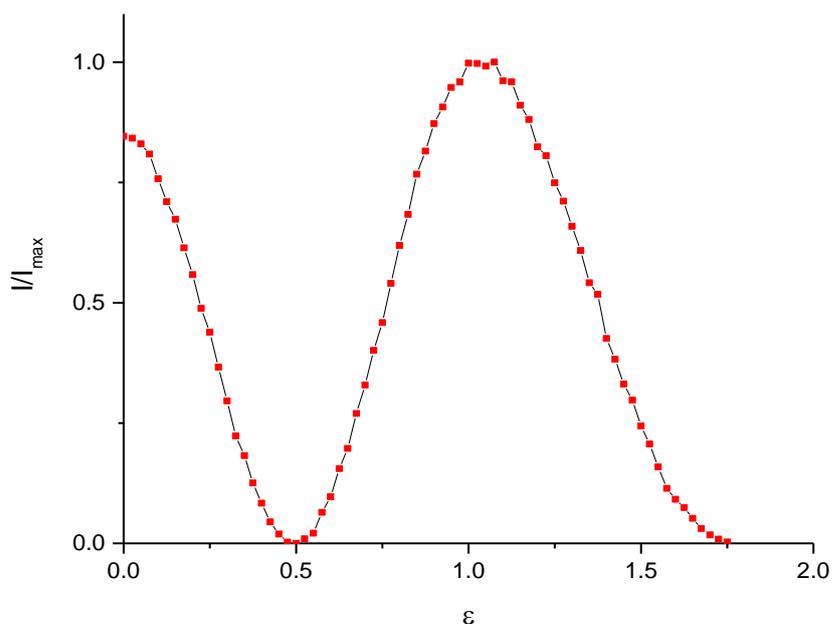


Рис. 4. Полоска скотча располагается между скрещенными поляризаторами и растягивается. На графике показана зависимость интенсивности прошедшего света красного лазера от относительного удлинения полоски скотча.

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 Δn от ε , 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.

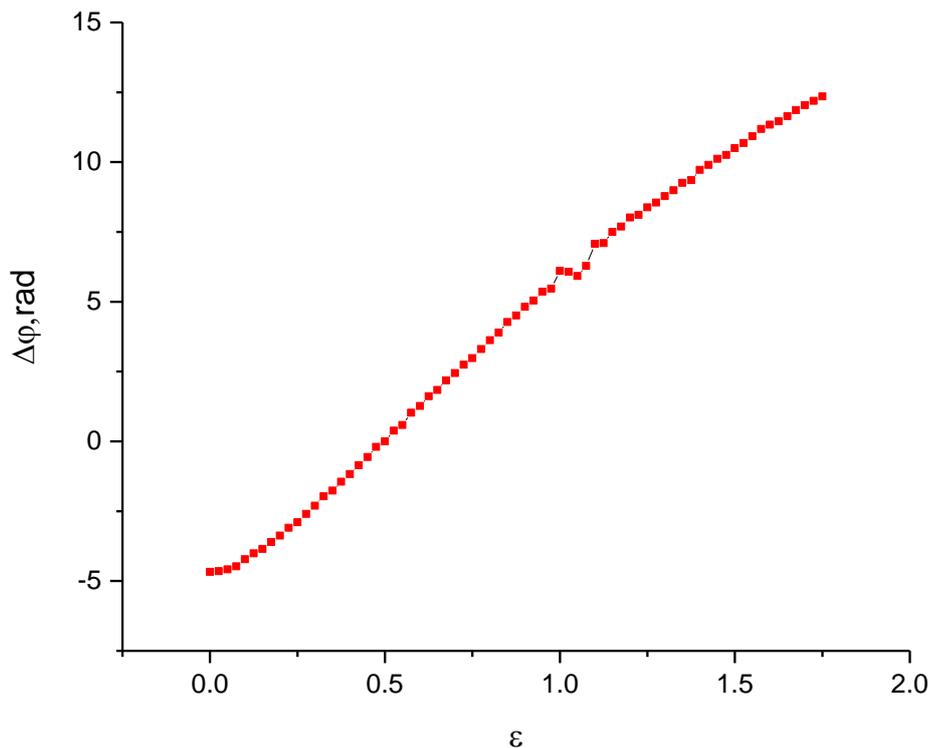


Рис. 5. Зависимость разности фаз $\Delta\varphi$ между волнами разных поляризаций от относительного удлинения ε скотча.

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

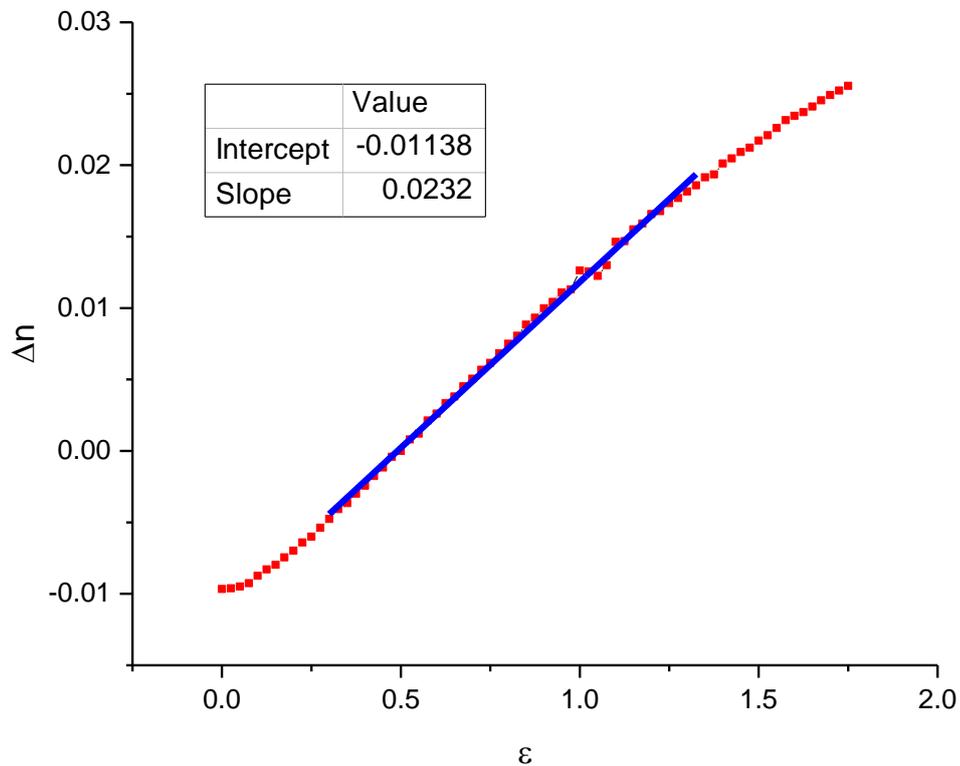


Рис. 6. Зависимость разности показателей преломления Δn от относительно удлинения скотча ε .

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 ε (если изменение $\varepsilon < 1$, ставится 0,3)	0,5 балла
1.2	Описано изменение интенсивности в зависимости от ε (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 ≥ 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 ε : $\varepsilon < 0,5$	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 λ , 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