

00^{-20.00} **Внимание!** В состав выданных соленоидов входит легкоплавкое оргстекло (температура плавления 140 °С). Сопротивление терморезистора в процессе проведения эксперимента **НЕ ДОЛЖНО** превышать 145 Ом.
Поломка оборудования в случае действий вопреки инструкциям условия приведёт к вашей дисквалификации с тура!

A0^{1.00} Запишите расстояние x_0 между осями соленоидов при отсутствии тока через них.
После сборки установки пригласите дежурного по аудитории сфотографировать вашу установку.

На фотографии должны быть видны:

1. Соленоиды, закрепленные на нитях как можно большей длины. Соленоиды должны быть расположены параллельно и горизонтально!
2. Провода, выведенные через верх рядом с точками подвеса соленоидов (иначе провода будут создавать дополнительный отклоняющий момент сил).

Вся установка должна быть закреплена и не может поддерживаться руками!

Внимание! В случае нарушения порядка сборки установки и признания установки непригодной для измерений или отсутствия фотографии, **все пункты, связанные с измерениями и обработкой данных, БУДУТ ОЦЕНЕНЫ В 0 БАЛЛОВ!**

Зафиксируем равновесное расстояние между осями соленоидов в отсутствие тока:

Ответ:

$$x_0 = 5.1 \text{ см}$$

A1^{0.30} Получите формулу, связывающую силу отталкивания F соленоидов друг от друга с расстоянием x между ними. Выразите эту силу через магнитные заряды q_m на концах соленоидов, длину соленоидов l , x и μ_0 .

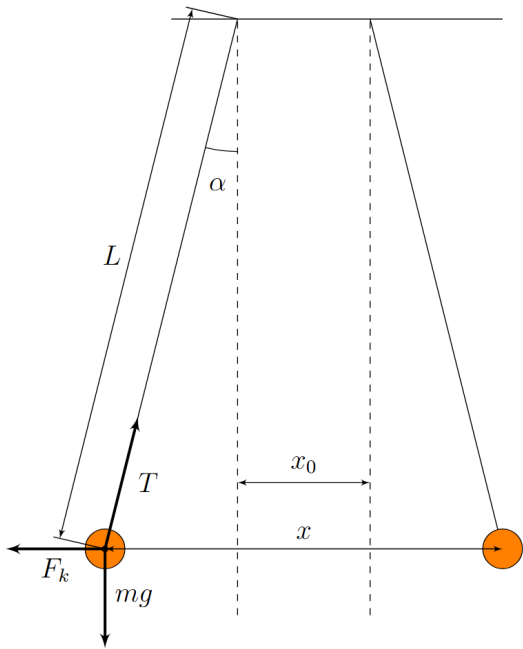
Рассмотрим соленоид, отклонившийся на малый угол α от положения равновесия (см. рисунок 2). Запишем II закон Ньютона для этого соленоида в проекции на ось y :

$$2F_k \cos \alpha = mg \sin \alpha.$$

Коэффициент 2 появляется из-за того, что соленоид имеет два полюса (магнитных заряда), каждый из которых взаимодействует с соседним полюсом другого соленоида. Учитывая, что для малого угла α справедливы формулы $\sin \alpha \approx \alpha \approx \frac{x - x_0}{2L}$ и $\cos \alpha \approx 1$, преобразуем II закон Ньютона:

$$F_k = \frac{mg}{2} \frac{x - x_0}{2L} = \frac{\mu_0 q_m^2}{4\pi} \left(\frac{1}{x^2} - \frac{x}{(x^2 + l^2)^{\frac{3}{2}}} \right)$$

Во всех пунктах задачи использовались высота подвеса $h = 1.37$ м и плотность намотки $n = \frac{N}{l} = \frac{300}{20.9 \text{ см}} = 1435 \text{ м}^{-1}$.



Ответ:

$$F = 2F_k = 2 \frac{mg}{2} \frac{x - x_0}{2L} = \frac{\mu_0 q_m^2}{2\pi} \left(\frac{1}{x^2} - \frac{x}{(x^2 + l^2)^{\frac{3}{2}}} \right)$$

A2^{0.20} Выразите индукцию магнитного поля B в центре сердечников соленоидов через расстояние x между ними, массу соленоидов m , длину подвеса L , а также другие необходимые величины.

В **A4** введения было сказано, что магнитный заряд соленоида равен потоку вектора индукции магнитного поля B через торец соленоида. Этот поток равен:

Φ_B = B · S

где *B* – значение индукции магнитного поля на торце соленоида, *S* – площадь сечения соленоида.

А значит:

μ₀*q_m* = B · S

Подставляя формулу для магнитного заряда *q_m* в формулу для силы Кулона, получим:

F_k = (mg / 2) * ((x - x₀) / (2L)) = (B²S² / 4πμ₀) * ((1 / x²) - (x / (x² + l²)^(3/2)))

Выразим отсюда индукцию магнитного поля внутри соленоида *B* через расстояние *x* между соленоидами:

Ответ:

B = (1 / S) * sqrt((πμ₀mg(x - x₀)) / ((1 / x²) - (x / (x² + l²)^(3/2))) * L)

A3 5.00

Измерьте зависимость расстояния *x* между осями соленоидов от силы тока *I*, протекающего через каждый из соленоидов, изменяя ток в диапазоне от −5 А до +5 А с шагом 0.2 А, а при токах меньше 0.6 А по модулю – с шагом 0.15 А. Поскольку магнитная проницаемость сердечника соленоида зависит от температуры, старайтесь, чтобы в рамках ваших измерений температура соленоидов отклонялась от комнатной температуры не более чем на 10 °С.

Снимем зависимость расстояния между соленоидами *x* от силы тока *I*, протекающего по ним, в диапазоне токов от −5 А до +5 А.

Ответ:

<i>I</i> , А	<i>x</i> , см	<i>I</i> , А	<i>x</i> , см	<i>I</i> , А	<i>x</i> , см	<i>I</i> , А	<i>x</i> , см
-5	9	-2,2	8,1	0,3	5,3	3	8,5
-4,8	9	-2	7,9	0,45	5,6	3,2	8,6
-4,6	9	-1,8	7,6	0,6	5,9	3,4	8,7
-4,4	8,9	-1,6	7,5	0,8	6,2	3,6	8,7
-4,2	8,9	-1,4	7,2	1	6,6	3,8	8,7
-4	8,8	-1,2	7	1,2	6,8	4	8,8
-3,8	8,7	-1	6,6	1,4	7,2	4,2	8,9
-3,6	8,7	-0,8	6,4	1,6	7,5	4,4	8,9
-3,4	8,6	-0,6	6	1,8	7,6	4,6	8,9
-3,2	8,6	-0,45	5,8	2	7,8	4,8	8,9
-3	8,5	-0,3	5,6	2,2	8	5	8,9
-2,8	8,4	-0,15	5,3	2,4	8,2		
-2,6	8,3	0	5,1	2,6	8,2		
-2,4	8,2	0,15	5,1	2,8	8,4		

A4 1.20

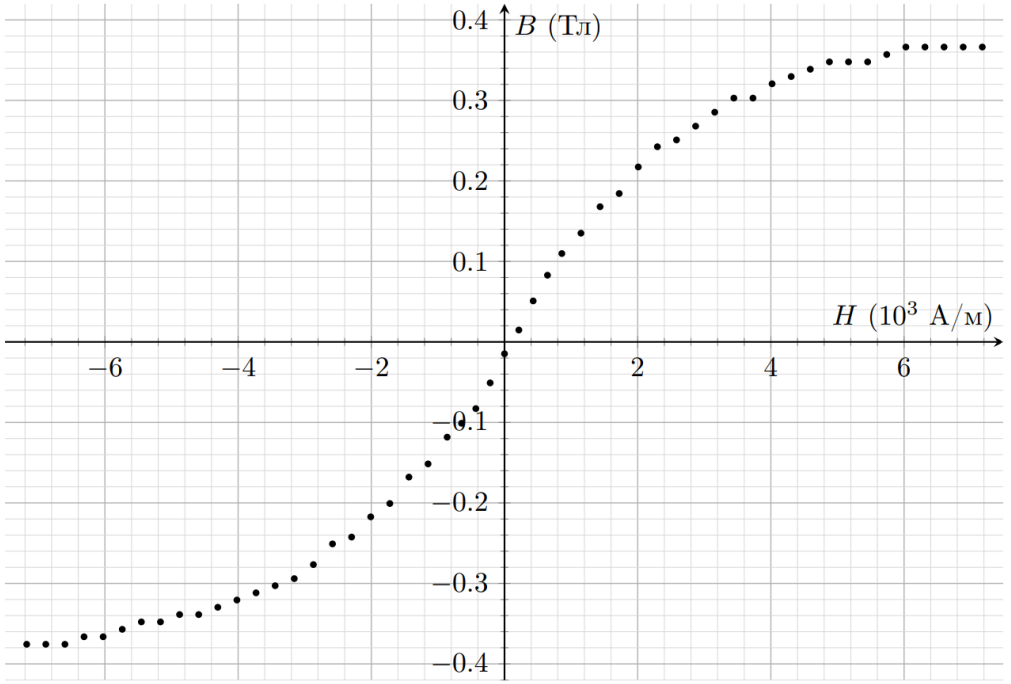
Из полученной в А3 зависимости рассчитайте значения индукции магнитного поля *B* внутри соленоида и напряженности магнитного поля *H* = *nI* внутри соленоида, где *n* – это число витков на единицу длины соленоида, *I* – ток через соленоид. Постройте график зависимости *B*(*H*) для токов *I* от −5 А до +5 А, пренебрегая гистерезисом.

Рассчитаем значения *H* и *B*. Построим петлю гистерезиса для данных значений *H* и *B* (красная петля на рисунке 3).

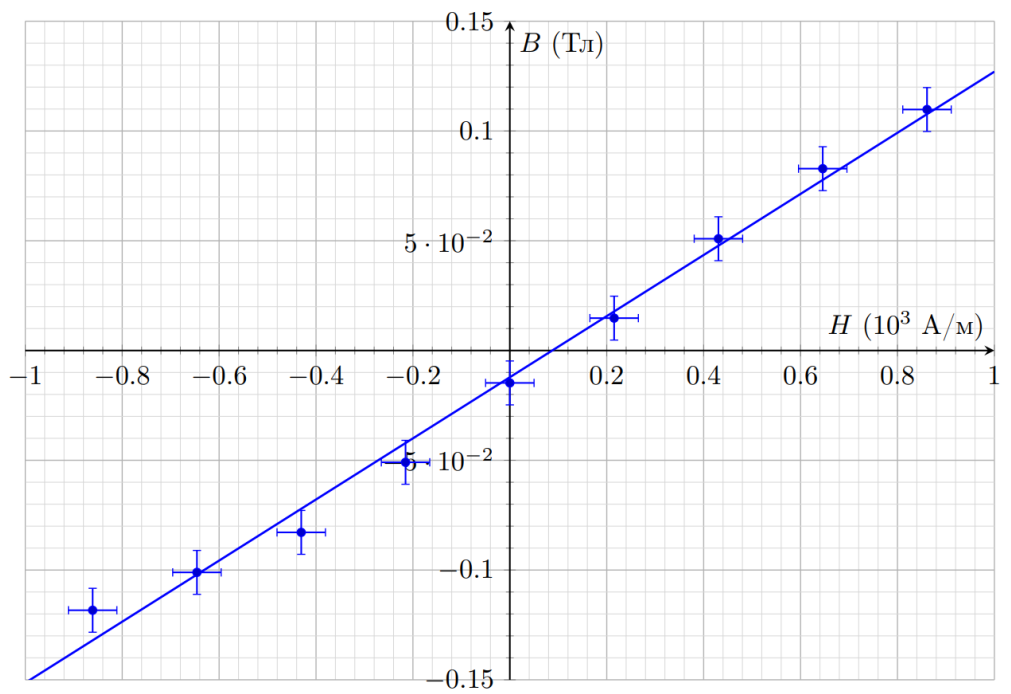
<i>H</i> , А/м	<i>B</i> , Тл	<i>H</i> , А/м	<i>B</i> , Тл	<i>H</i> , А/м	<i>B</i> , Тл	<i>H</i> , А/м	<i>B</i> , Тл
-7175	-0,37563	-3157	-0,29406	430,5	0,050919	4305	0,329651

-6888	-0,37563	-2870	-0,27663	645,75	0,082839	4592	0,338711
-6601	-0,37563	-2583	-0,25091	861	0,109779	4879	0,347838
-6314	-0,3663	-2296	-0,24244	1148	0,135063	5166	0,347838
-6027	-0,3663	-2009	-0,21731	1435	0,167933	5453	0,347838
-5740	-0,35703	-1722	-0,20076	1722	0,184312	5740	0,357033
-5453	-0,34784	-1435	-0,16793	2009	0,217314	6027	0,366298
-5166	-0,34784	-1148	-0,15155	2296	0,242443	6314	0,366298
-4879	-0,33871	-861	-0,11832	2583	0,250912	6601	0,366298
-4592	-0,33871	-645,75	-0,10107	2870	0,268003	6888	0,366298
-4305	-0,32965	-430,5	-0,08284	3157	0,285315	7175	0,366298
-4018	-0,32066	-215,25	-0,05092	3444	0,302862		
-3731	-0,31173	0	-0,01476	3731	0,302862		
-3444	-0,30286	215,25	0,01476	4018	0,320657		

Ответ:



A5^{0,30} Оцените по экспериментальным данным остаточную намагниченность B_r для петли гистерезиса из A4.



из графика из пункта A4 находим:

Ответ:

$$B_r = (15 \pm 5) \text{ мТл}$$

А6 0.30 Оцените по экспериментальным данным коэрцитивную силу H_c для петли гистерезиса из **A4**.

Соленоиды возвращаются в исходное положение равновесие при токе через них $I \approx 150 \text{ мА}$. Выразим коэрцитивную силу:

Ответ:

$$H_c = (85 \pm 20) \text{ А/м}$$

А7 0.20 При каком максимальном по модулю токе, текущем через соленоиды, зависимость $B(H)$ в пренебрежении гистерезисом все ещё описывается прямой пропорциональностью?

Зависимость $B(H)$ становится нелинейной при $H > 1000 \text{ А/м}$, что соответствует:

Ответ: $I_{cr} = 0.8 \text{ А}$

А8 1.50 Вычислите магнитную проницаемость $\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH}$ сердечника соленоида на линейном участке.

Для повышения точности измерений используйте линеаризацию, не требующую знания величины x_0 .

Значение магнитной восприимчивости железного сердечника можно вычислить по формуле:

$$\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH}$$

Максимальную магнитную восприимчивость $\mu_{\max}$ железный сердечник будет иметь тогда, когда отношение $\frac{dB}{dH}$ максимально, то есть вблизи нуля.

Максимальный ток не должен превышать значения I_{cr} , найденного в пункте **A7**.

Условие равновесия:

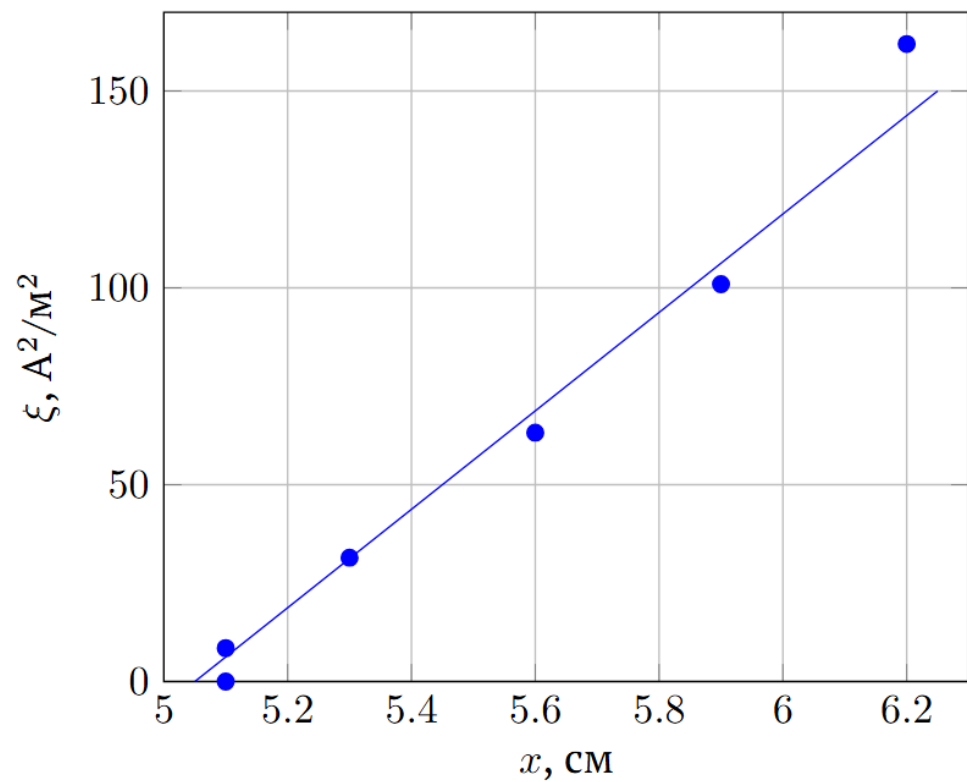
$$B = \frac{1}{S} \sqrt{\frac{\pi \mu_0 m g (x - x_0)}{\left(\frac{1}{x^2} - \frac{x}{(x^2 + l^2)^{\frac{3}{2}}}\right) L}} = \mu \mu_0 n I$$

Отсюда зависимость

$$\xi(x) = I^2 \cdot \left(\frac{1}{x^2} - \frac{x}{(x^2 + l^2)^{\frac{3}{2}}}\right)$$

линейна. Произведем пересчет точек и построим график полученной зависимости:

$I, \text{ А}$	$x, \text{ см}$	$\xi, \text{ А}^2/\text{м}^2$
0	5,1	0
0,15	5,1	8,51
0,3	5,3	31,47
0,45	5,6	63,23
0,6	5,9	100,94
0,8	6,2	161,93



Рассчитаем угловой коэффициент полученного графика:

$$k = \frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{\pi m g}{\mu_0 L S^2 n^2 \mu^2} = (14300 \pm 600) \frac{\text{A}^2}{\text{M}^3},$$

откуда:

$$\mu = \sqrt{\frac{\pi m g}{\mu_0 L S^2 n^2 k}} = 94 \pm 4$$

Ответ:

$$\mu = 94 \pm 4$$

B1^{0.30} Получите теоретическое выражение, связывающее расстояние x между соленоидами и ток I через один соленоид. В ответ может входить функция $B(H)$ и любые необходимые величины.

Аналогично части А:

$$B(nI) = \frac{1}{S} \sqrt{\frac{\pi \mu_0 m g (x_0 - x)}{\left(\frac{1}{x^2} - \frac{x}{(x^2 + l^2)^{\frac{3}{2}}}\right) L}} \approx \frac{x}{S} \sqrt{\frac{\pi \mu_0 m g (x_0 - x)}{L}}$$

Ответ:

$$B(nI) = \frac{x}{S} \sqrt{\frac{\pi \mu_0 m g (x_0 - x)}{L}}$$

B2^{1.00} При каком минимальном токе I_{high} происходит резкое «слипание» соленоидов при плавном увеличении тока? В ответ может входить функция $H(B)$ и любые необходимые величины.

Резкое слипание соленоидов происходит в момент, когда их равновесие становится неустойчивым. Условие равновесия:

$$\frac{B^2(nI)S^2L}{x^2} = \pi \mu_0 m g (x_0 - x)$$

Дифференцируем по x :

$$-2 \frac{B^2(nI)S^2L}{x^3} = -\pi \mu_0 m g$$

Решая совместно, получаем:

$$x = 2x_0/3$$

$$B^2(nI)S^2L = \frac{4\pi}{27} \mu_0 m g x_0^3$$

$$F_k = \frac{mg}{2} \frac{x - x_0}{2L} = \frac{\mu_0 q_m^2}{4\pi} \left(\frac{1}{x^2} - \frac{x}{(x^2 + l^2)^{\frac{3}{2}}} \right)$$

Ответ:

$$B(nI_{\text{high}}) = \sqrt{\frac{4\pi}{27S^2L}\mu_0mgx_0^3}$$

В3 0.30

При каком токе I_{low} соленоиды разлипаются обратно? В ответ может входить функция $H(B)$ и любые необходимые величины.

После слипания соленоиды находятся в равновесии из-за силы реакции, возникающей при их давлении друг на друга. Разлипание происходит в момент $N = 0$:

$$B(nI_{\text{low}}) = \frac{x_1}{S} \sqrt{\frac{\pi\mu_0mg(x_0 - x_1)}{L}},$$

где $x_1 = 2.5$ см – расстояние между осями соленоидов, когда они прижаты друг к другу вплотную.

Ответ:

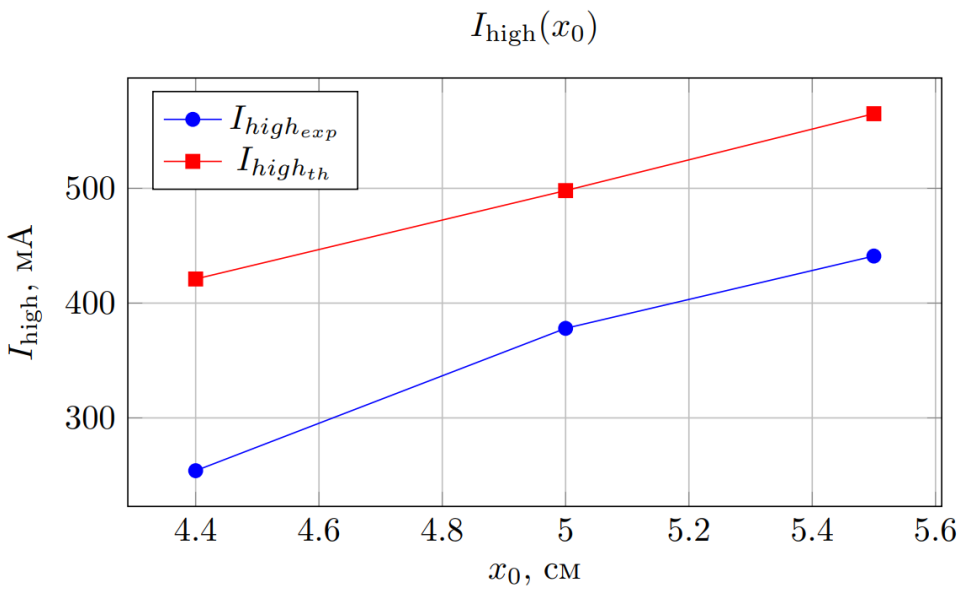
$$B(nI_{\text{low}}) = \frac{x_1}{S} \sqrt{\frac{\pi\mu_0mg(x_0 - x_1)}{L}}$$

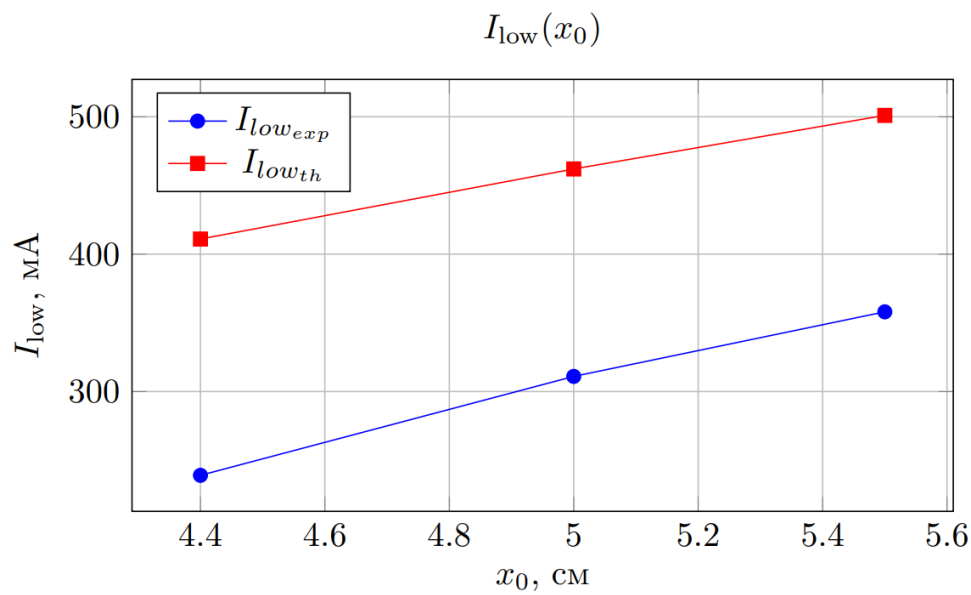
В4 1.90

Измерьте зависимость $I_{\text{low,high}}(x_0)$ для трех разных значений x_0 . Постройте эти зависимости на одном графике с теоретическими зависимостями, рассчитанными по кривой, полученной в предыдущей части. Расходятся ли какие-то из этих зависимостей с теоретическими? Если да, объясните причину.

Измерим зависимости $I_{\text{low,high}}(x_0)$, рассчитаем соответствующие теоретические значения и построим соответствующие графики:

x_0 , см	$I_{high_{exp}}$	$I_{low_{exp}}$	B_{high}	B_{low}	$I_{high_{th}}$	$I_{low_{th}}$
4,40	254	239	0,0720	0,0699	421	411
5,1	378	311	0,0898	0,0818	511	470
5,5	396	321	0,1006	0,0878	565	501





Ответ: Обе зависимости расходятся с теоретическими т.к. провода создают дополнительный крутящий момент.

C1^{4.50} Получите не менее четырех различных значений $\mu(T)$. Для измерения используйте отталкивание, как в части **A**. Если вы собираете установку заново, вы **не можете** использовать значение, полученное в части **A** при комнатной температуре. Это связано с тем, что отличия в значениях μ , возникающие из-за неидеальности сборки установки, могут быть сравнимы с измеряемым эффектом. При обработке экспериментальных данных используйте линейризацию из **A8**. **Внимание!** Выданные сердечники обладают малой теплопроводностью. Вы можете считать температуру сердечника равной температуре термодпары при поддержании соответствующей постоянной температуры термодпары **не менее 10 минут**.

Выданные сердечники нагреваются достаточно медленно. Выставим постоянное значение тока через катушки. По истечении 10 минут выкрутим ток в ноль, снимем зависимость расстояния между осями соленоидов от тока через них. Гистерезис можно не учитывать т.к. он мал и в линейризации будет влиять на постоянный сдвиг. Максимальный ток не должен превышать значения I_{cr} , найденного в пункте **A8**. В зависимостях не должно быть большого количества точек т.к. сердечники остынут.

Условие равновесия такое же, как в части **A**:

$$B = \frac{1}{S} \sqrt{\frac{\pi \mu_0 m g (x - x_0)}{\left(\frac{1}{x^2} - \frac{x}{(x^2 + l^2)^{\frac{3}{2}}}\right) L}} = \mu \mu_0 n I$$

Отсюда зависимость

$$\xi(x) = I^2 \cdot \left(\frac{1}{x^2} - \frac{x}{(x^2 + l^2)^{\frac{3}{2}}} \right)$$

линейна.

Снимем зависимости $I(x)$ при четырех различных температурах. Сердечник остывает достаточно медленно, поэтому в качестве температуры проведения эксперимента запишем температуру, соответствующую показаниям омметра в момент начала проведения измерений.

$R = 111 \text{ Ом}, T = 299 \text{ К}$

$I, \text{ А}$	$x, \text{ см}$	$\xi, \text{ А}^2/\text{м}^2$
0	6,1	0
0,15	6,2	5,69
0,3	6,4	21,3
0,45	6,5	46,4
0,6	6,7	77,5
0,75	6,9	113,8
0,9	7,3	145,5

$R = 122 \text{ Ом}, T = 328 \text{ К}$

$I, \text{ А}$	$x, \text{ см}$	$\xi, \text{ А}^2/\text{м}^2$
0	6,2	0,0
0,15	6,3	5,5
0,3	6,4	21,3

$R = 131\text{ Ом}, T = 352\text{ К}$

0,45	6,5	46,4
0,6	6,7	77,5
0,75	7	110,4
0,9	7,2	149,8

$R = 143\text{ Ом}, T = 383\text{ К}$

$I, \text{ А}$	$x, \text{ см}$	$\xi, \text{ А}^2/\text{м}^2$
0	6,2	0,0
0,15	6,4	5,3
0,3	6,5	20,6
0,45	6,6	45,0
0,6	6,7	77,5
0,75	7	110,4
0,9	7,2	149,8

$I, \text{ А}$	$x, \text{ см}$	$\xi, \text{ А}^2/\text{м}^2$
0	6,2	0,0
0,15	6,3	5,5
0,3	6,4	21,3
0,45	6,5	46,4
0,6	6,7	77,5
0,75	6,9	113,8
0,9	7,1	154,3

Угловые коэффициенты получим с помощью МНК. Полученные значения связаны с параметрами сердечников следующим образом:

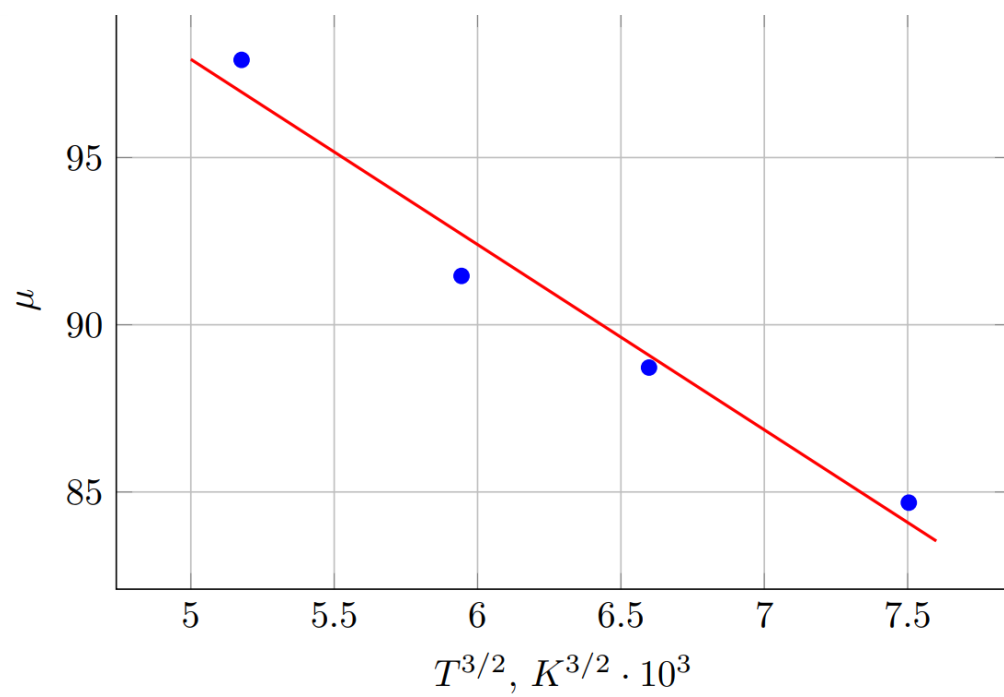
$$k = \frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{\pi m g}{\mu_0 L S^2 n^2 \mu^2},$$

откуда:

$$\mu = \sqrt{\frac{\pi m g}{\mu_0 L S^2 n^2 k}}$$

Рассчитаем значения $\mu(T)$ и построим линеаризованный график:

$T, \text{ К}$	$k, \text{ А}^2/\text{м}^3$	μ	$T^{\frac{3}{2}}, \text{ К}^{\frac{3}{2}}$
299	13200	97,92	5177
328	15130	91,46	5944
352	16080	88,72	6598
383	17650	84,68	7504



C2^{2.00}

Определите $\mu(0)$ и T_c для выданных сердечников.

Угловой коэффициент построенного графика:

$$k = -\mu(0)T_c^{-\frac{3}{2}} = -5.54 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-\frac{3}{2}},$$

Свободный член:

$$\mu(0) = 126$$

Отсюда:

$$T_c = 800 \text{ K}$$

Ответ:

$$\mu(0) = 126$$

$$T_c = 800 \text{ K}$$