

Пример образцового оформления отчета о задаче практикума

РАБОТА 306 Температурная зависимость намагниченности.

III

I Цель работы.

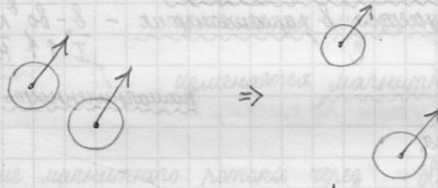
Изучение поведения намагниченности ферромагнетика в зависимости от температуры и определение его температуры Кюри.

II Теоретическая часть.

(подробное описание свойств ферромагнетиков - см. теоретическую часть работы 305)

У атомов во всех веществах есть собственный магнитный момент, обусловленный главным образом спиновыми магнитными моментами электронов. ФЕРРОМАГНЕТИКИ самопроизвольно разбиваются на так называемые домены - области, в которых магнитные моменты всех атомов сонаправлены, и которые намагничены до насыщения. Это называется дальним магнитным порядком.

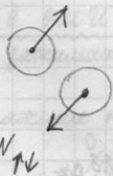
Наличие доменов обусловлено так называемым обменным взаимодействием между атомами, при котором спиновые магнитные моменты электронов ориентируются параллельно.



потенциальная энергия W кулоновского взаимодействия атомов уменьшается, $\Delta W < 0$
суммарная кинетическая энергия K атомов увеличивается, $\Delta K > 0$

В силу принципа Паули электроны с параллельными спинами не могут находиться рядом друг с другом.

При некоторых условиях $|\Delta W| > \Delta K$
состояние, в которое придет атом, окажется энергетически выгодным



а такую ситуацию принцип Паули допускает

Обменное взаимодействие характеризуется энергией обменного взаимодействия

$$W_{об} = W_{\uparrow\uparrow} - W_{\uparrow\downarrow}$$

Тепловые колебания атомов нарушают упорядоченное расположение спинов в доменах.

При повышении температуры эти колебания происходят интенсивней

⇒

способность к намагничиванию у ферромагнетиков уменьшается, магнитные характеристики, в частности, ~~интенсивность~~ намагниченности насыщения H_s , уменьшаются.

При некоторой температуре, так называемой ТОЧКЕ КЮРИ T_c , ферромагнитные свойства (в частности, самопроизвольное намагничивание) исчезают.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА



1. I_1 изменяется \Rightarrow изменяется магнитное поле, или создаваемое
 \Downarrow
 изменяется магнитное поле внутри образца
 \Downarrow
 изменяется магнитный поток через обмотки измерительной катушки

Изменение магнитного потока через 1 виток $d\Phi = S_{\text{обр}} dB$

изменение магнитного потока через всю обмотку N_2 $d\Psi = N_2 d\Phi = N_2 S_{\text{обр}} dB$ (*)

ЭДС \mathcal{E} на зажимах обмотки $\mathcal{E} = - \frac{d\Psi}{dt} = - N_2 S_{\text{обр}} \frac{dB}{dt}$ (*)

2. Напряжение на конденсаторе в момент времени t

$$U_C(t) = \frac{q(t)}{C} = \frac{1}{C} \int_0^t I_a(\varphi) d\varphi$$

Запишем II правило Кирхгофа для контура L:

$$L: \mathcal{E} = I_a R_a + U_C \Rightarrow I_a(t) = \frac{\mathcal{E} - U_C(t)}{R_a}$$

$$U_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t \frac{\mathcal{E} - U_C(\varphi)}{R_a} d\varphi = \frac{1}{R_a C} \int_0^t (\mathcal{E} - U_C(\varphi)) d\varphi$$

R_a и C подобраны так, что $\frac{1}{\omega C} \ll R_a \Rightarrow U_C(\varphi) \ll U_{R_a}(\varphi)$
 $U_C(\varphi) \ll \mathcal{E}$
 сопротивление конденсатора переменному току

$$U_C(t) \approx \frac{1}{R_a C} \int_0^t \mathcal{E} d\varphi = \frac{1}{R_a C} \int_0^t -N_2 S_{\text{обр}} \frac{dB}{d\varphi} d\varphi = - \frac{N_2 S_{\text{обр}}}{R_a C} \int_0^B dB \Rightarrow$$

$$\Rightarrow U_c(t) = -\frac{N_a S_{\text{обр}}}{R_a C} B \Rightarrow B = -\frac{R_a C}{N_a S_{\text{обр}}} U_c(t) \quad (**)$$

г. Пусть C_y - модуль чувствительности осциллографа по каналу y :

напряжение на конденсаторе изображается отрезком

$$y = -\frac{U_c(t)}{C_y} \quad (**)$$

$$\left. \begin{array}{l} (***) \\ (***) \end{array} \right\} \Rightarrow B = -\frac{R_a C}{N_a S_{\text{обр}}} (-y C_y) = \frac{R_a C C_y}{N_a S_{\text{обр}}} y$$

▲ y

Δ X

1. Модуль напряжённости магнитного в катушке I_1 при прохождении по ней тока I_1

$$H = n I_1 (*), \quad n - \text{число витков катушки на единицу длины}$$

Через резистор R_1 проходит ток I_1

⇓ закон Ома для участка цепи

$$I_1 = \frac{U_x}{R_1} (*) \Rightarrow H = n \frac{U_x}{R_1} \quad (***)$$

д. Пусть C_x - чувствительность осциллографа по каналу X

напряжение на концах резистора R_1 изображается отрезком

$$x = \frac{U_x}{C_x}$$

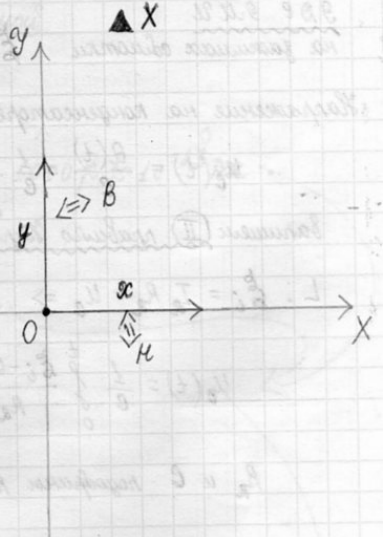
$$\left. \begin{array}{l} (***) \\ (***) \end{array} \right\} \Rightarrow H = n \frac{U_x C_x}{R_1} = \frac{n U_x}{R_1} \frac{R_1 C_x}{R_1} x$$

Магнитная индукция поля в образце

$$B = \frac{R_a C C_y}{N_a S_{\text{обр}}} y$$

Напряжённость внешнего магнитного поля

$$H = \frac{n C_x}{R_1} x$$



III Практическая часть.

Параметры установки

$N_1 = 300$	$R_1 = 6 \text{ кОм}$	$C = 2 \text{ мкФ}$	$C_x = 0,17 \text{ В/дел}$
$N_2 = 400$	$R_2 = 25 \text{ кОм}$		$C_y = 2,0 \text{ мВ/дел}$
$d = 20,2 \text{ мм}$	Площадь сечения образца		
$D = 22,8 \text{ мм}$	$S_{\text{свр}} = k \cdot \left(\frac{D-d}{2}\right)$		
$h = 5,2 \text{ мм}$			

Упражнение 1. Получение кривой гистерезиса и определение магнитных параметров образца при комнатной температуре.

OA = 2 дел. дел

OB = 14 дел.

OC = 7 дел

OD = 12 дел.

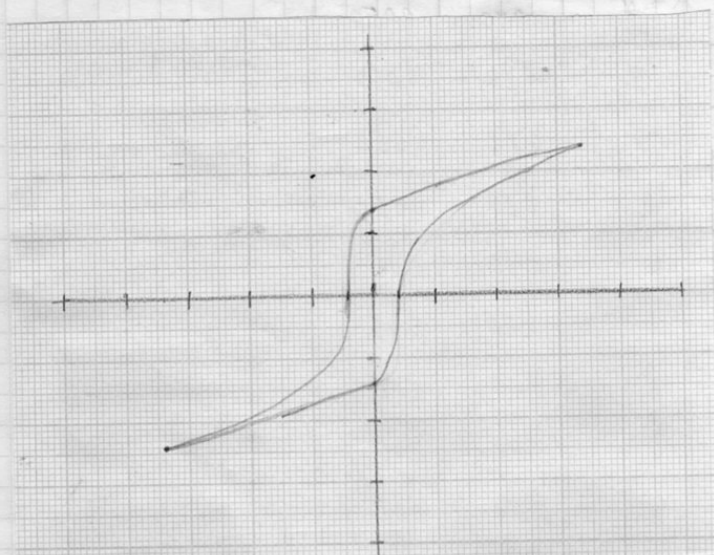
Упражнение 2. Измерение зависимости индукции намагничивания ферромагнитного образца от температуры и определение точки Кюри.

$U, \text{ мВ}$	$t, ^\circ\text{C}$	$B_{\text{ср}}, \text{ Тл}$	OD, дел	$B_s, \text{ Тл}$	$B_{\text{ср}}, \text{ Тл}$
0,020, 0,10	20	0,5	7	0,40	0,050
0,40	30	0,5	7	0,40	0,050
0,70	40	0,5	7	0,40	0,050
1,10	50	0,5	7	0,40	0,05
1,40	60	0,5	6	0,60	0,05
1,80	70	0,5	6	0,60	0,05
2,20	80	0,5	6	0,60	0,05
2,60	90	0,5	6	0,60	0,05
2,90	100	0,5	5	0,50	0,05
3,00	104	0,5	5	0,50	0,05
3,20	108	0,5	5	0,50	0,05

результат

$U, \text{мВ}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{\text{гипп}}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{\text{д}}, \text{дел}$	$B_s, \text{Плр}$	$\sigma_{\text{гипп}}, B_s, \text{Плр}$
3,30	112	0,5	5	0,50	0,05
3,50	116	0,5	4	0,40	0,05
3,60	118	0,5	4	0,40	0,05
3,70 3,65	120	0,5	4	0,40	0,05
3,70	122	0,5	4	0,40	0,05
3,80	124	0,5	3	0,30	0,05
3,85	126	0,5	3	0,30	0,05
3,90	128	0,5	3	0,30	0,05
3,95	130	0,5	3	0,30	0,05
4,00	132	0,5	3	0,30	0,05
4,05	134	0,5	2	0,20	0,05
4,10	136	0,5	1	0,10	0,05
4,15	138	0,5	1	0,10	0,05
4,20	140	0,5	1	0,10	0,05
4,25	142	0,5	0	0,00	0,05
4,30	144	0,5	0	0,00	0,05

Правильно



ВОССТАНОВИВШАЯСЯ ПЕТЛЯ ГИСТЕРЕЗИСА.

Правильно

IV) Обработка результатов измерений.

Упражнение 1. Получение петли гистерезиса и определение магнитных параметров образца при комнатной температуре.

Погрешность считывания отрезков на экране осциллографа

$$\sigma_{\text{чит}} = 0,5 \text{ дел.}$$

Число витков катушки N_2 на единицу длины

$$n = \frac{N_2}{2\pi r}, \quad r = \frac{D+d}{2}$$

$$n = \frac{N_2}{2\pi \frac{D+d}{2}} = \frac{2N_2}{\pi(D+d)}$$

Коэрцитивная сила H_c

Среднее значение

$$\overline{H_c} = \frac{n C \alpha}{R_2} \cdot [0, \alpha] = \frac{2N_2 C \alpha}{\pi R_2 (D+d)} \cdot [0, \alpha]$$

Стандартное выборочное отклонение

$$S_{H_c} = 0$$

Систематическая погрешность

$$\sigma_{\text{сист}, H_c} = \sqrt{\left(\frac{\partial H_c}{\partial [0, \alpha]}\right)^2 \cdot \sigma_{\text{чит}}^2} = \frac{2N_2 C \alpha}{\pi R_2 (D+d)} \sigma_{\text{чит}}$$

Суммарная погрешность

$$\sigma_{\text{сумм}, H_c} = \sqrt{S_{H_c}^2 + \sigma_{\text{сист}, H_c}^2} = \frac{2N_2 C \alpha}{\pi R_2 (D+d)} \sigma_{\text{чит}}$$

Доверительный интервал (коэффициент доверия $\alpha = 0,5$)

$$\Delta_{\text{сумм}, H_c} = \sigma_{\text{сумм}, H_c} \cdot T_{\alpha}$$

$$T_{\alpha} = \frac{1}{1-\alpha}$$

Напряженность намагнивающего поля H_3

Среднее значение

$$\overline{H_3} = \frac{2N_2 C \alpha}{\pi R_2 (D+d)} \cdot [0, \alpha]$$

Стандартное выборочное отклонение

$$S_{H_3} = 0$$

Систематическая погрешность

$$\sigma_{\text{сист}, H_3} = \sqrt{\left(\frac{\partial H_3}{\partial [0, \alpha]}\right)^2 \cdot \sigma_{\text{чит}}^2} = \frac{2N_2 C \alpha}{\pi R_2 (D+d)} \sigma_{\text{чит}}$$

Суммарная погрешность

$$\sigma_{\text{сумм}, N_3} = \sqrt{S_{N_3}^2 + \sigma_{\text{сист}, N_3}^2} = \frac{2N_2 C \vartheta}{\pi (D+d) R_1} \sigma_{\text{сумм}}$$

Доверительный интервал (коэффициент доверия $\alpha = 0,5$)

$$\Delta_{\text{сумм}, N_3} = \sigma_{\text{сумм}, N_3} \cdot T_{\alpha}$$

$$T_{\alpha} = \sqrt{\frac{1}{1-\alpha}}$$

Остаточная индукция B_r

Среднее значение

$$\bar{B}_r = \frac{R_2 C \vartheta}{N_2 h (D-d)} \cdot [\overline{OC}] = \frac{2R_2 C \vartheta}{N_2 h (D-d)} \cdot [\overline{OC}]$$

Стандартное вычисленное отклонение

$$S_{B_r} = 0$$

Систематическая погрешность

$$\sigma_{\text{сист}, B_r} = \sqrt{\left(\frac{\partial B_r}{\partial [OC]}\right)^2 \cdot \sigma_{\text{сумм}}^2} = \frac{2R_2 C \vartheta}{N_2 h (D-d)} \sigma_{\text{сумм}}$$

Суммарная погрешность

$$\sigma_{\text{сумм}, B_r} = \sqrt{S_{B_r}^2 + \sigma_{\text{сист}, B_r}^2} = \frac{2R_2 C \vartheta}{N_2 h (D-d)} \sigma_{\text{сумм}}$$

Доверительный интервал (коэффициент доверия $\alpha = 0,5$)

$$\Delta_{\text{сумм}, B_r} = \sigma_{\text{сумм}, B_r} \cdot T_{\alpha}$$

$$T_{\alpha} = \sqrt{\frac{1}{1-\alpha}}$$

Индукция насыщения B_s

Среднее значение

$$\bar{B}_s = \frac{2R_2 C \vartheta}{N_2 h (D-d)} \cdot [\overline{OD}]$$

Стандартное вычисленное отклонение

$$S_{B_s} = 0$$

Суммарная погрешность

Систематическая

$$\sigma_{\text{сист}, B_s} = \frac{2R_2 C \vartheta}{N_2 h (D-d)} \sigma_{\text{сумм}}$$

Суммарная погрешность

$$\sigma_{\text{сумм}, B_s} = \sqrt{S_{B_s}^2 + \sigma_{\text{сист}, B_s}^2} = \frac{2R_2 C \vartheta}{N_2 h (D-d)} \sigma_{\text{сумм}}$$

Доверительный интервал (коэффициент доверия $\alpha = 0,5$)

$$T_{\alpha} = \sqrt{\frac{1}{1-\alpha}}$$

μ_c

$$\bar{\mu}_c = \frac{2 \cdot 300 \cdot 0,14}{\pi(2,98 + 20,2) \cdot 10^{-3} \cdot 62} \cdot 2 \approx 20,96 \frac{\mu}{\mu}$$

$$\sigma_{\text{сумм}, \mu_c} = \frac{2 \cdot 300 \cdot 0,14}{\pi(2,98 + 20,2) \cdot 10^{-3} \cdot 62} \cdot 0,5 \approx 5,24 \frac{\mu}{\mu}$$

$$\Delta_{\text{сумм}, \mu_c} \approx 5,24 \cdot \sqrt{\frac{1}{1-0,5}} \approx 7,41 \frac{\mu}{\mu}$$

μ_g

$$\bar{\mu}_g = \frac{2 \cdot 300 \cdot 0,14}{\pi(2,98 + 20,2) \cdot 10^{-3} \cdot 62} \cdot 14 \approx 148,14 \frac{\mu}{\mu}$$

$$\sigma_{\text{сумм}, \mu_g} = \frac{2 \cdot 300 \cdot 0,14}{\pi(2,98 + 20,2) \cdot 10^{-3} \cdot 62} \cdot 0,5 \approx 5,24 \frac{\mu}{\mu}$$

$$\Delta_{\text{сумм}, \mu_g} \approx 5,24 \cdot \sqrt{\frac{1}{1-0,5}} \approx 7,41 \frac{\mu}{\mu}$$

ν_r

$$\bar{\nu}_r = \frac{2 \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \cdot 10^{-3}}{400 \cdot 5 \cdot 2 \cdot 10^{-3} (2,98 - 20,2) \cdot 10^{-3}} \cdot 7 \approx 0,401 \text{ Пл}$$

$$\sigma_{\text{сумм}, \nu_r} = \frac{2 \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \cdot 10^{-3}}{400 \cdot 5 \cdot 2 \cdot 10^{-3} (2,98 - 20,2) \cdot 10^{-3}} \cdot 0,5 \approx 0,050 \text{ Пл}$$

$$\Delta_{\text{сумм}, \nu_r} \approx 0,050 \cdot \sqrt{\frac{1}{1-0,5}} \approx 0,071 \text{ Пл}$$

ν_s

$$\bar{\nu}_s = \frac{2 \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \cdot 10^{-3}}{400 \cdot 5 \cdot 2 \cdot 10^{-3} (2,98 - 20,2) \cdot 10^{-3}} \cdot 12 \approx 1,202 \text{ Пл}$$

$$\sigma_{\text{сумм}, \nu_s} = \frac{2 \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \cdot 10^{-3}}{400 \cdot 5 \cdot 2 \cdot 10^{-3} (2,98 - 20,2) \cdot 10^{-3}} \cdot 0,5 \approx 0,050 \text{ Пл}$$

$$\Delta_{\text{сумм}, \nu_s} \approx 0,050 \cdot \sqrt{\frac{1}{1-0,5}} \approx 0,071 \text{ Пл}$$

$$\mu_c = (\bar{\mu}_c \pm \Delta_{\text{сумм}, \mu_c})$$

$$\mu_c = (20,96 \pm 7,41) \cdot 10^4 \frac{\mu}{\mu}$$

Коэффициент доверия $\alpha = 0,5$

$$\nu_r = (\bar{\nu}_r \pm \Delta_{\text{сумм}, \nu_r})$$

$$\nu_r = (0,40 \pm 0,07) \text{ Пл}$$

Коэффициент доверия $\alpha = 0,5$

$$\mu_g = (\bar{\mu}_g \pm \Delta_{\text{сумм}, \mu_g})$$

$$\mu_g = (148,14 \pm 7,41) \cdot 10^4 \frac{\mu}{\mu}$$

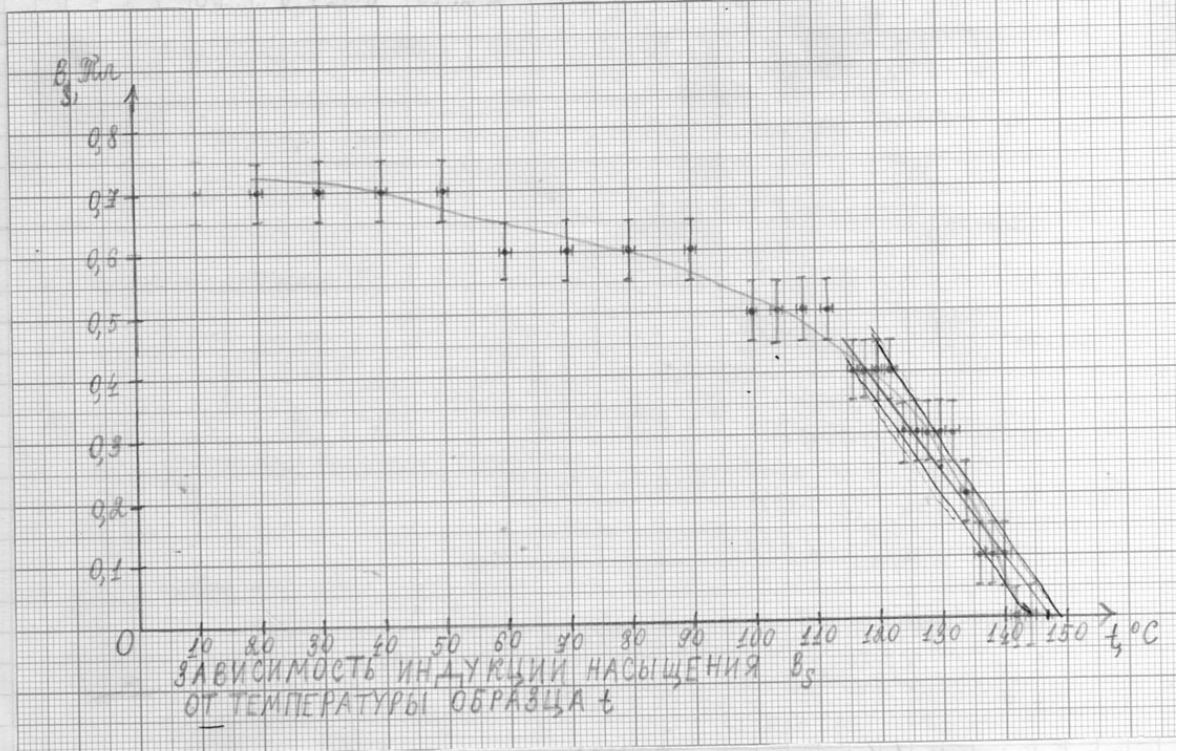
Коэффициент доверия $\alpha = 0,5$

$$\nu_s = (\bar{\nu}_s \pm \Delta_{\text{сумм}, \nu_s})$$

$$\nu_s = (1,20 \pm 0,07) \text{ Пл}$$

Коэффициент доверия $\alpha = 0,5$

Упражнение 2. Измерение зависимости индукции насыщения ферромагнитного образца от температуры и определение точки Кюри.



Применение метода наименьших квадратов для наиболее крутого участка зависимости $B_s(t)$ (значения вычислялись на ЭВМ)

$$B_s = A \cdot t + B$$

(А)

Среднее значение

$$\bar{A} = -0,014 \frac{\text{Тл}}{^\circ\text{C}}$$

Стандартное выходящее отклонение

$$S_A = 0,002 \frac{\text{Тл}}{^\circ\text{C}}$$

Систематическая погрешность

$$\sigma_{\text{сист}, A} = 0$$

Суммарная погрешность

$$\sigma_{\text{сумм}, A} = \sqrt{S_A^2 + \sigma_{\text{сист}, A}^2} = 0,002 \frac{\text{Тл}}{^\circ\text{C}}$$

(В)

Среднее значение

$$\bar{B} = 2,07 \text{ Тл}$$

Стандартное выходящее отклонение

$$S_B = 0,85 \text{ Тл}$$

Систематическая погрешность

$$\sigma_{\text{сист}, B} = 0$$

Суммарная погрешность

$$\sigma_{\text{сумм}, B} = \sqrt{S_B^2 + \sigma_{\text{сист}, B}^2} = 0,85 \text{ Тл}$$

Коэффициент взаимной корреляции $r = 0,93$

Определение температуры Кюри T_c

Среднее значение

$$\bar{T}_c = -\frac{\bar{B}}{\bar{A}}$$

Суммарная погрешность

$$\sigma_{\text{сумм}, T_c} = \sqrt{\left(\frac{\partial T_c}{\partial B} \cdot \sigma_{\text{сумм}, B}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_c}{\partial A} \cdot \sigma_{\text{сумм}, A}\right)^2}$$

$$\frac{\partial T_c}{\partial B} = -\frac{1}{\bar{A}} \quad \frac{\partial T_c}{\partial A} = \frac{\bar{B}}{\bar{A}^2}$$

Доверительный интервал (коэффициент доверия $\alpha = 0,5$)

$$\Delta_{\text{сумм}, T_c} = \sigma_{\text{сумм}, T_c} \cdot Z_\alpha$$

$$Z_\alpha = \sqrt{\frac{1}{1-\alpha}}$$

$$\bar{T}_c = -\frac{2,04}{-0,014} \approx 145,86^\circ\text{C}$$

$$\sigma_{\text{сумм}, T_c} = \sqrt{\left(-\frac{1}{-0,014} \cdot 0,005\right)^2 + \left(\frac{2,04}{0,014^2} \cdot 0,0002\right)^2} \approx 32,79^\circ\text{C}$$

$$\Delta_{\text{сумм}, T_c} \approx 32,79 \cdot \sqrt{\frac{1}{1-0,5}} \approx 46,89^\circ\text{C}$$

$$T_c = (\bar{T}_c \pm \Delta_{\text{сумм}, T_c})$$

$$T_c = (1,5 \pm 0,3) \cdot 10^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Коэффициент доверия $\alpha = 0,5$

Ⓢ Выводы по проделанной работе.

Полученная зависимость индукции насыщения B_s от температуры образца t примерно похожа на характерную зависимость для нагревания ферромагнетика. Значение температуры Кюри совпадает с характерным значением для ферромагнитных сплавов с высоким содержанием никеля ($T_c < 150^\circ\text{C}$).

Погрешность определения температуры Кюри достаточно велика. Возможно, это связано с тем, что осциллограф не реагировал на небольшие изменения B_s при небольшом повышении температуры, и полученные значения были сняты не достаточно точно.

$$I = \frac{B}{\mu_0} - H$$

