

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №33

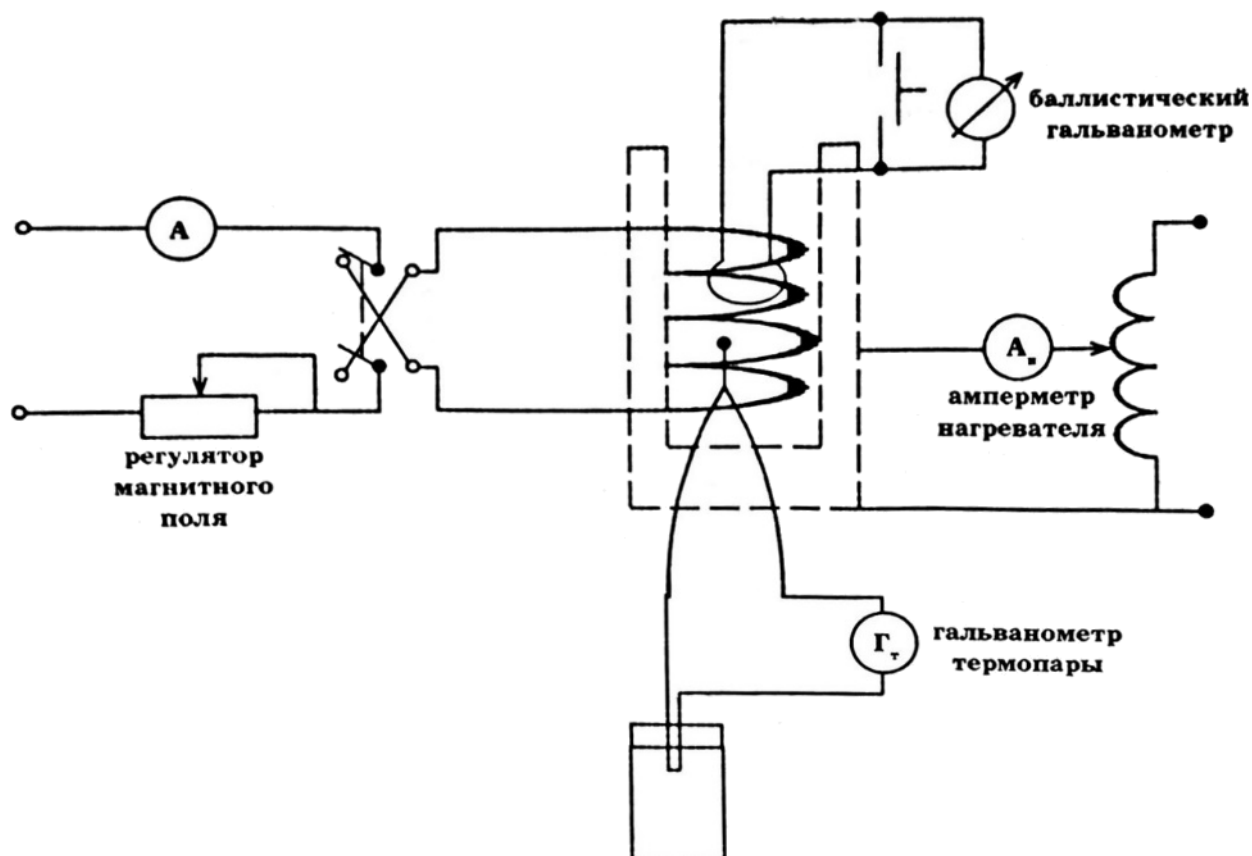
ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ НАМАГНИЧЕННОГО НИКЕЛЯ

Поляков Даниил, 19.Б23-фз

Цели работы:

- экспериментально определить значение намагничивающего тока I , соответствующее рабочей напряжённости магнитного поля, при которой никелевый образец находится в состоянии насыщения;
- измерить зависимость баллистического отброса α от температуры T ;
- вычислить коэффициент размагничивания образца m ;
- определить баллистическую постоянную гальванометра C'_b ;
- рассчитать значения магнитной индукции внутри образца B при рассмотренных значениях температуры;
- рассчитать значения напряжённости магнитного поля внутри образца с поправкой на размагничивающее действие концов H' при рассмотренных значениях температуры;
- рассчитать значения намагниченности образца M при рассмотренных значениях температуры;
- определить точку Кюри T_c для никеля;
- рассчитать магнитный момент иона никеля μ ;
- рассчитать постоянную молекулярного поля γ .

Схема установки



Параметры установки:

- сечение измерительной катушки: $S_0 = 7.1 \text{ см}^2$;
- эффективное сечение никелевого стержня: $S_{\text{Ni}} = 0.11 \text{ см}^2$;
- количество витков измерительной катушки: $N_0 = 71$;
- длина намагничивающей катушки: $l = 0.43 \text{ м}$;
- эксцентриситет осевого сечения образца: $\varepsilon = 0.9969$;
- количество витков намагничивающей катушки: $N = 2000$.

Расчётные формулы

- Усреднённое значение баллистического отброса:

$$\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$$

α_1 — баллистический отброс при прямом направлении тока;

α_2 — баллистический отброс при противоположном направлении тока.

- Напряжённость магнитного поля, создаваемая намагничивающей катушкой:

$$H = I \frac{N}{l}$$

I — сила намагничивающего тока;

N — количество витков намагничивающей катушки;

l — длина намагничивающей катушки.

- Коэффициент размагничивания образца:

$$m = \left(\frac{1}{\varepsilon^2} - 1 \right) \left(\frac{1}{2\varepsilon} \ln \frac{1+\varepsilon}{1-\varepsilon} - 1 \right)$$

ε — эксцентриситет осевого сечения образца.

- Баллистическая постоянная гальванометра:

$$C'_b = \frac{2\mu_0 H S_0 N_0}{\alpha_0}$$

μ_0 — магнитная постоянная;

H — напряжённость магнитного поля, создаваемая намагничивающей катушкой;

S_0 — сечение измерительной катушки;

N_0 — количество витков измерительной катушки;

α_0 — баллистический отброс при температуре выше точки Кюри.

- Магнитная индукция внутри образца:

$$B = \frac{C'_b \alpha}{2N_0 S_{Ni}} - \mu_0 H \frac{S_0 - S_{Ni}}{S_{Ni}}$$

C'_b — баллистическая постоянная гальванометра;

α — баллистический отброс;

N_0 — количество витков измерительной катушки;

μ_0 — магнитная постоянная;

H — напряжённость магнитного поля, создаваемая намагничивающей катушкой;

S_0 — сечение измерительной катушки;

S_{Ni} — эффективное сечение никелевого стержня.

- Напряжённость магнитного поля внутри образца с поправкой на размагничивающее действие концов:

$$H' = \frac{H - m \frac{B}{\mu_0}}{1 - m}$$

H — напряжённость магнитного поля, создаваемая намагничивающей катушкой;

B — магнитная индукция внутри образца;

m — коэффициент размагничивания образца;

μ_0 — магнитная постоянная.

- Намагниченность образца:

$$M = \frac{B}{\mu_0} - H'$$

B — магнитная индукция внутри образца;

μ_0 — магнитная постоянная;

H' — напряжённость магнитного поля внутри образца с поправкой на размагничивающее действие концов.

- Число ионов никеля в единице объёма:

$$n = \frac{N_A \rho}{m} = 9.13 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$$

N_A — число Авогадро;

$\rho = 8.90 \text{ г/см}^3$ — плотность никеля;

$m = 58.7 \text{ г/моль}$ — молярная масса никеля.

- Магнитный момент иона никеля:

$$\mu = \frac{M_0}{n}$$

M_0 — намагниченность образца при комнатной температуре;

n — число ионов никеля в единице объёма.

- Постоянная молекулярного поля:

$$\gamma = \frac{3kT_c}{n\mu^2}$$

k — постоянная Больцмана;

T_c — точка Кюри никеля;

n — число ионов никеля в единице объёма;

μ — магнитный момент иона никеля.

- Формулы для вычисления погрешностей:

- Абсолютная погрешность косвенных измерений:

$$\Delta_{f(x_1, x_2, \dots)} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot \Delta_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \cdot \Delta_{x_2}\right)^2 + \dots}$$

$$\Delta_H = \left| \frac{\partial H}{\partial I} \cdot \Delta_I \right| = \left| \frac{N}{l} \cdot \Delta_I \right|$$

$$\Delta_{C'_b} = \sqrt{\left(\frac{\partial C'_b}{\partial H} \cdot \Delta_H\right)^2 + \left(\frac{\partial C'_b}{\partial \alpha_0} \cdot \Delta_\alpha\right)^2} = |C'_{bl}| \sqrt{\left(\frac{\Delta_H}{H}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_\alpha}{\alpha_0}\right)^2}$$

$$\begin{aligned} \Delta_B &= \sqrt{\left(\frac{\partial B}{\partial C'_b} \cdot \Delta_{C'_b}\right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial \alpha} \cdot \Delta_\alpha\right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial H} \cdot \Delta_H\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{\alpha}{2N_0 S_{Ni}} \cdot \Delta_{C'_b}\right)^2 + \left(\frac{C'_b}{2N_0 S_{Ni}} \cdot \Delta_\alpha\right)^2 + \left(\mu_0 \frac{S_0 - S_{Ni}}{S_{Ni}} \cdot \Delta_H\right)^2} \end{aligned}$$

$$\Delta_{H'} = \sqrt{\left(\frac{\partial H'}{\partial H} \cdot \Delta_H\right)^2 + \left(\frac{\partial H'}{\partial B} \cdot \Delta_B\right)^2} = \left| \frac{1}{1-m} \right| \sqrt{(\Delta_H)^2 + \left(\frac{m}{\mu_0} \cdot \Delta_B\right)^2}$$

$$\Delta_M = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial B} \cdot \Delta_B\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial H'} \cdot \Delta_{H'}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_B}{\mu_0}\right)^2 + (\Delta_{H'})^2}$$

$$\Delta_\mu = \left| \frac{\partial \mu}{\partial M_0} \cdot \Delta_{M_0} \right| = \left| \frac{\Delta_{M_0}}{n} \right|$$

$$\Delta_\gamma = \sqrt{\left(\frac{\partial \gamma}{\partial T_c} \cdot \Delta_{T_c}\right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma}{\partial \mu} \cdot \Delta_\mu\right)^2} = |\gamma| \sqrt{\left(\frac{\Delta_{T_c}}{T_c}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta_\mu}{\mu}\right)^2}$$

Порядок измерений

1. Сначала необходимо определить рабочее значение намагничивающего тока, при котором никелевый образец находится в состоянии насыщения, т. е. магнитные моменты всех его ионов одинаковы. При отключенном нагревателе (т. е. при комнатной температуре) измерим зависимость баллистического отброса α от силы тока намагничивающей катушки I . Используя реостат и амперметр, установим начальное значение тока I . В установке имеется переключатель, включающий или выключающий баллистический гальванометр, и ключ с тремя положениями, пускающий ток по катушке либо в прямом, либо в противоположном направлении. С помощью переключателя включаем гальванометр. Переключив ключ в одно из направлений, фиксируем значение баллистического отброса гальванометра α_1 (т. е. значение по шкале гальванометра, на котором находится изображение в момент максимального отклонения). Как только изображение пересечёт крайнее положение, переключаем ключ в нулевое положение и нажимаем кнопку, успокаивающую баллистический гальванометр, чтобы вернуть изображение в начальное положение. Затем измеряем баллистический отброс α_2 , переключив ключ в противоположное направление, т. е. при противоположной полярности тока.

После этого временно выключаем баллистический гальванометр. С помощью реостата увеличиваем ток через катушку I . Для исключения влияния гистерезиса следует периодически проводить операцию размагничивания образца. Для этого при выключенном гальванометре несколько раз быстро переключаем направление тока с помощью ключа. Включаем гальванометр и проводим аналогичные измерения баллистического отброса.

Продолжаем увеличивать значение тока и измерять баллистический отброс до тех пор, пока не выйдем на линейный участок зависимости. При установке нового значения тока каждый раз проводим операцию размагничивания. В конце выбираем рабочее значение тока примерно посередине полученного линейного участка.

2. Устанавливаем выбранное рабочее значение тока. Включаем нагреватель. По мере роста температуры проводим измерения значений баллистического отброса α , соответствующих значениям температуры T , методом, аналогичным предыдущей части работы. Продолжаем повышать температуру, пока не будет достигнуто значение 350 °С.

Результаты

1. Определение рабочего тока

Цена деления амперметра 0.05 А. Погрешность измерений тока примем равной половине цены деления:

$$\Delta_I = 0.03 \text{ А}$$

Из-за особенности метода измерения баллистического отброса — необходимо зафиксировать положение изображения в короткий момент времени — погрешность его измерений оценим как цену деления линейки:

$$\Delta_\alpha = 0.10 \text{ см}$$

Таблица 1.

Зависимость баллистического отброса от силы намагничивающего тока

$I, \text{ А}$	$\alpha_1, \text{ см}$	$\alpha_2, \text{ см}$	$\alpha, \text{ см}$
0.60	13.1	12.7	12.90
0.80	15.6	15.2	15.40
0.90	16.7	16.3	16.50
1.00	17.7	17.2	17.45
1.10	18.7	18.2	18.45
1.20	19.6	19.0	19.30
1.30	20.3	19.7	20.00
1.40	21.0	20.4	20.70
1.50	21.7	21.1	21.40
1.60	22.4	21.7	22.05

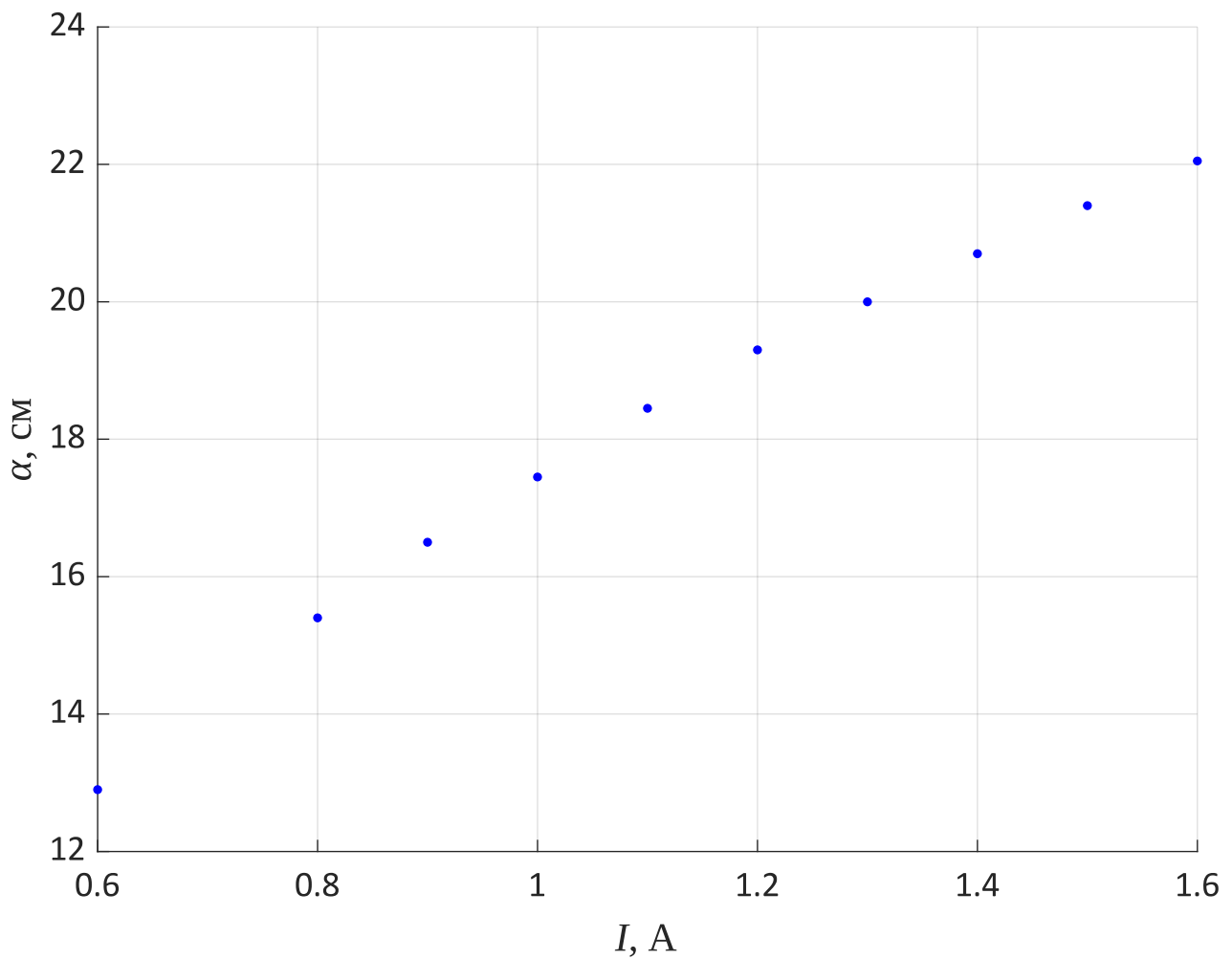


График 1.

Зависимость баллистического отброса от силы намагничивающего тока

Зависимость баллистического отброса от тока становится линейной, начиная с $I = 1.2 \text{ A}$. Выбираем значение рабочего тока:

$$I = 1.40 \pm 0.03 \text{ A}$$

Напряжённость магнитного поля, создаваемая намагничивающей катушкой при этом значении тока:

$$H = 6510 \pm 120 \text{ A/м}$$

2. Исследование зависимости баллистического отброса от температуры

Измерения баллистического отброса производились в ходе увеличения температуры. Цена деления прибора 0.1 °С, но измерения занимали некоторое время, в ходе которого температура продолжала расти, поэтому погрешность температуры оценим как:

$$\Delta_T = 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Таблица 2. Зависимость баллистического отброса и других параметров установки от температуры образца

$T, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\alpha_1, \text{ см}$	$\alpha_2, \text{ см}$	$\alpha, \text{ см}$	$B, \text{ Тл}$	$H', \times 10^3 \text{ А/м}$	$M, \times 10^3 \text{ А/м}$
20	21.0	20.4	20.70	1.23 ± 0.04	-7.3 ± 0.5	990 ± 30
100	18.4	18.1	18.25	1.02 ± 0.04	-4.9 ± 0.5	820 ± 30
125	16.5	16.9	16.70	0.89 ± 0.04	-3.5 ± 0.4	710 ± 30
150	15.1	15.2	15.15	0.76 ± 0.03	-2.0 ± 0.4	610 ± 30
175	10.5	10.1	10.30	0.35 ± 0.02	2.7 ± 0.3	280 ± 20
200	7.3	6.5	6.90	0.06 ± 0.02	5.9 ± 0.2	44 ± 15
225	7.0	6.2	6.60	0.04 ± 0.02	6.2 ± 0.2	24 ± 15
250	6.7	6.3	6.50	0.03 ± 0.02	6.3 ± 0.2	17 ± 14
300	6.4	6.2	6.30	0.01 ± 0.02	6.5 ± 0.2	3 ± 14
310	6.5	6.3	6.40	0.02 ± 0.02	6.4 ± 0.2	10 ± 14
320	6.5	6.1	6.30	0.01 ± 0.02	6.5 ± 0.2	3 ± 14
330	6.5	6.2	6.35	0.02 ± 0.02	6.4 ± 0.2	7 ± 14
340	6.5	6.0	6.25	0.01 ± 0.02	6.5 ± 0.2	0 ± 14
350	6.5	6.0	6.25	0.01 ± 0.02	6.5 ± 0.2	0 ± 14

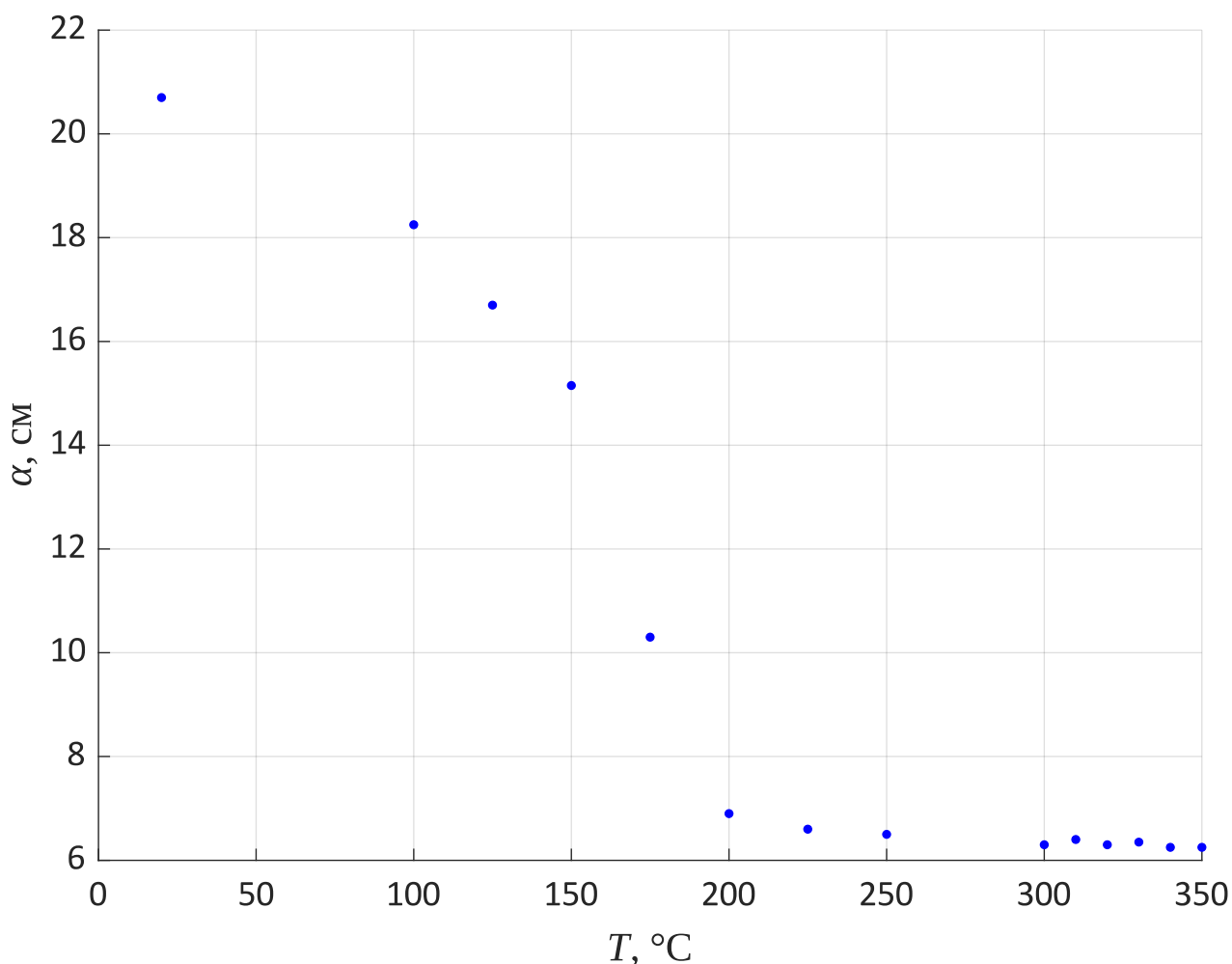


График 2. Зависимость баллистического отброса от температуры образца

С увеличением температуры образца баллистический отброс уменьшается, асимптотически приближаясь к минимальному значению. После пересечения точки Кюри баллистический отброс перестаёт меняться. По полученным в ходе данной работы данным сложно определить точку Кюри. Уже начиная с температуры 300 °C баллистический отброс меняется не более, чем на величину его погрешности. При этом минимальное значение $\alpha = 6.25$ см достигается, начиная с температуры 340 °C. Отсюда примерно оцениваем значение точки Кюри никеля и его погрешность:

$$T_c = 340 \pm 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Возможно, точка Кюри не была бы настолько размытой, если бы было выбрано меньшее значение рабочего тока (например, 1.2 А).

Далее рассчитаем остальные параметры установки:

- Коэффициент размагничивания образца:

$$m = 0.01398$$

- Баллистическая постоянная гальванометра:

$$C'_b = 0.0132 \pm 0.0003 \text{ Вб/м}$$

- Значения магнитной индукции внутри образца B , напряжённости магнитного поля внутри образца с поправкой на размагничивающее действие концов H' и намагниченности образца M при рассмотренных значениях температур указаны в таблице 2.
- Для расчёта магнитного момента иона никеля используем значение намагниченности образца M при минимальной рассмотренной температуре, т. е. при $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Получаем:

$$\mu = (1.08 \pm 0.04) \cdot 10^{-23} \text{ А} \cdot \text{м}^2$$

- Постоянная молекулярного поля:

$$\gamma = (2.4 \pm 0.2) \cdot 10^{-3} \text{ Дж} \cdot \text{А}^{-2} \cdot \text{м}^{-1}$$

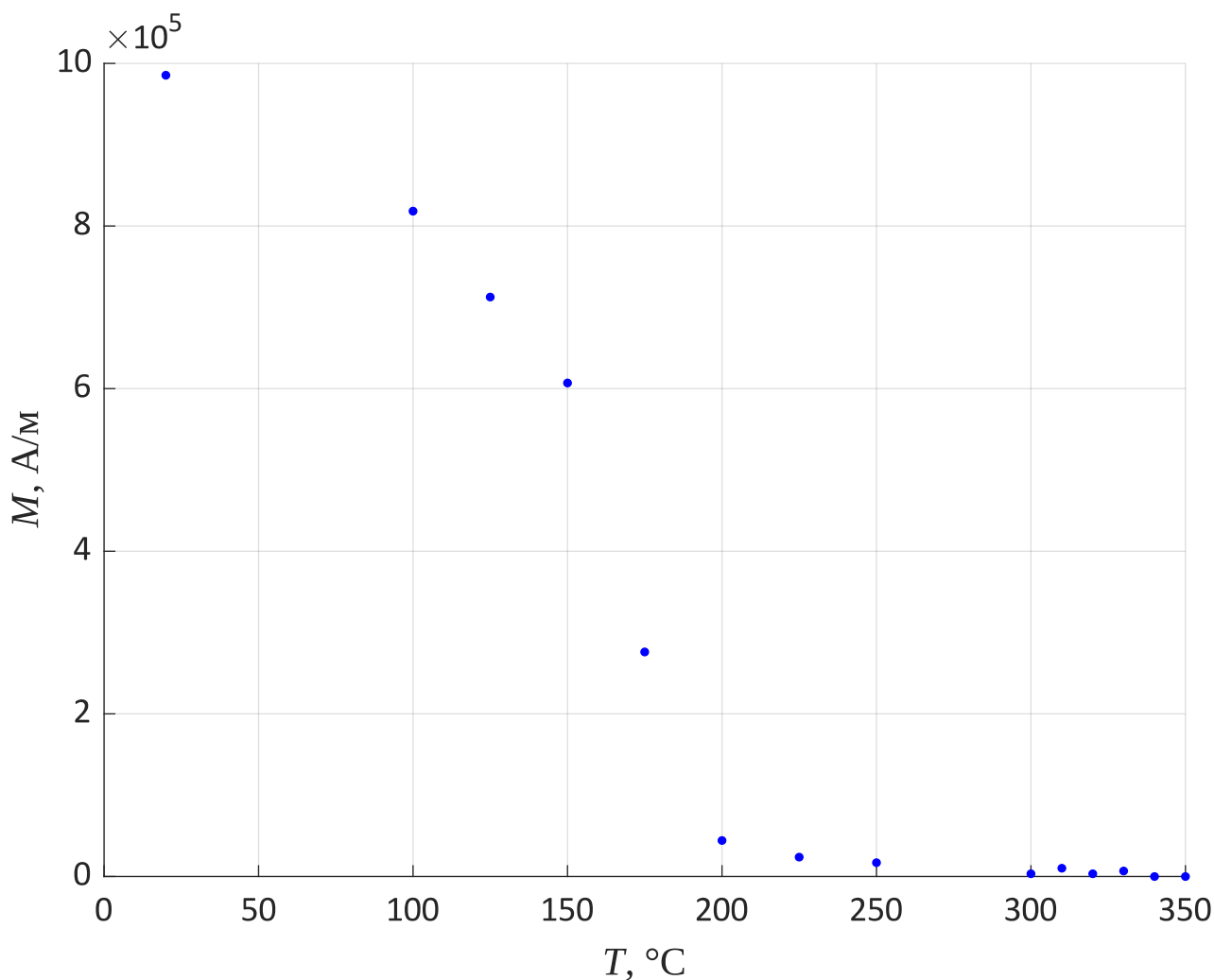


График 3. Зависимость намагниченности образца от его температуры

График по форме идентичен графику зависимости $\alpha(T)$, т. к. по расчётным формулам $\Delta M \sim \Delta \alpha$.

Выводы

Ферромагнетики при температуре ниже точки Кюри обладают самопроизвольной намагниченностью, которая обращается в ноль при достижении точки Кюри. Наличие этого свойства у никеля было успешно проверено в работе.

Экспериментально полученное значение точки Кюри никеля:

$$T_c = 340 \pm 20 ^\circ C$$

Табличное значение точки Кюри никеля:

$$T_c = 354 ^\circ C$$

Полученное значение близко к табличному, но определено с низкой точностью.