



Московский Физико-Технический Институт  
(национальный исследовательский университет)

Отчет по эксперименту

---

## Закон Кюри–Вейсса

---

*Работа №3.4.2; дата: 16.09.22*

*Семестр: 3*

Выполнил:  
Кошелев Александр

Группа:  
Б05-105

# 1. Аннотация

## Цель работы:

Изучение температурной зависимости магнитной восприимчивости ферромагнетика выше точки Кюри.

## Схема установки:

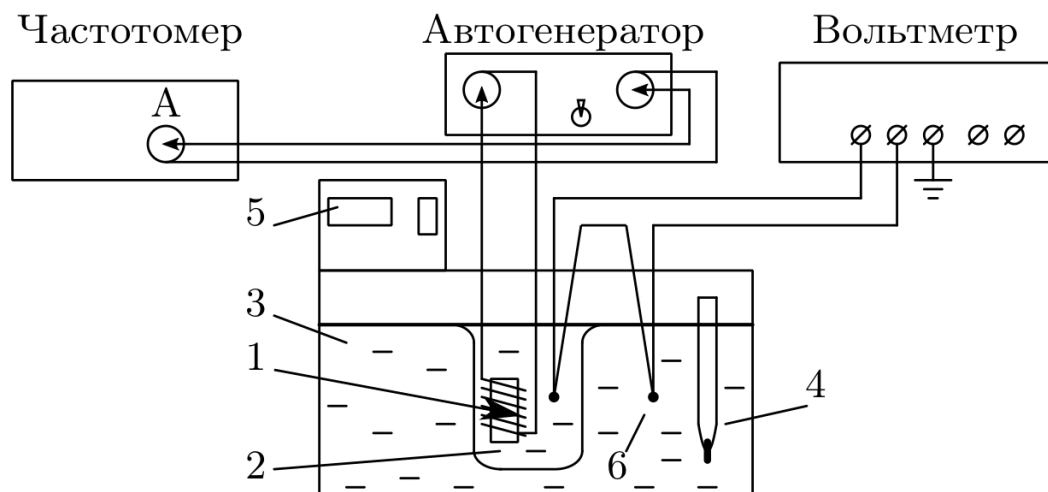


Рис. 1: Схема установки

Исследуемый ферромагнитный образец (гадолиний) расположен внутри пустотелой катушки самоиндукции, которая служит индуктивностью колебательного контура, входящего в состав  $LC$ -автогенератора.

Гадолиний является хорошим проводником электрического тока, а рабочая частота генератора достаточно велика (50 кГц), поэтому для уменьшения вихревых токов образец из готовлен из мелких кусочков размером 0.5 мм. Катушка 1 с образцом помещена в стеклянный сосуд 2, залитый трансформаторным маслом. Масло предохраняет образец от окисления и способствует ухудшению электрического контакта между отдельными частичками образца. Кроме того, оно улучшает тепловой контакт между образцом и термостатируемой (рабочей) жидкостью 3 в термостате. Ртутный термометр 4 используется для приближенной оценки температуры. При изменении температуры меняется магнитная восприимчивость образца  $\chi$ , а следовательно, самоиндукция катушки и период колебаний  $\tau$  автогенератора. Для измерения периода используется частотомер.

Для нагрева используется термостат. Температура исследуемого образца всегда несколько отличается от температуры дистиллированной воды в сосуде. После того как вода достигла заданной температуры, идёт медленный процесс выравнивания температур образца и воды. Разность их температур контролируется с помощью медноконстантановой термопары 6 и цифрового вольтметра. Один из спаев термопары находится в тепловом контакте с образцом, а другой погружён в воду. Концы термопары подключены к цифровому вольтметру. Рекомендуется измерять период колебаний автогенератора в тот момент, когда указанная разность температур становится  $\leq 0.5^\circ\text{C}$ . Чувствительность термопары  $k = 24 \text{ K/мВ}$ .

## В работе используются:

Катушка самоиндукции с образцом из гадолиния, термостат, частотомер, цифровой вольтметр,  $LC$ -автогенератор, термопара медь-константин.

## 2. Теоретические сведения

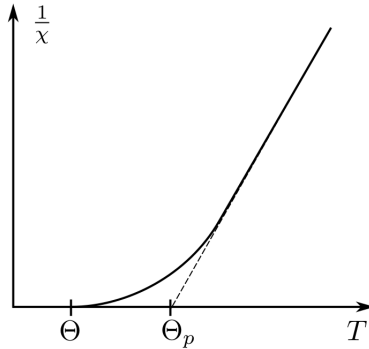
Ферромагнетики обладают свойством намагничиваться даже в слабых магнитных полях. Впервые количественную теорию ферромагнетизма разработал французский физик Вейсс в 1907 году. В настоящей работе для изучения температурной зависимости магнитной восприимчивости ферромагнетика выше точки Кюри (то есть в парамагнитной области) используется закон Кюри-Вейсса (который назван так по аналогии с законом Кюри для парамагнетиков).

$$\chi = \frac{C}{T - \Theta_p} \sim \frac{1}{T - \Theta_p} \quad (1)$$

где  $\chi$  – магнитная восприимчивость,  $C$  – постоянная Кюри, зависящая от вещества,  $T$  – абсолютная температура в кельвинах,  $\Theta_p$  – парамагнитная температура Кюри в кельвинах.

При повышении температуры  $T$  возрастает дезориентирующее действие теплового движения частиц, и магнитная восприимчивость парамагнетиков убывает, в простейшем случае (в постоянном магнитном поле) по закону Кюри.

При  $T \rightarrow 0$  тепловое движение всё меньше препятствует магнитным моментам атомов ориентироваться в одном направлении при сколь угодно слабом внешнем поле.



**Рис. 2:** График реальной зависимости  $\frac{1}{\chi}(T)$

В ферромагнетиках (под влиянием обменных сил) это происходит при понижении температуры не до абсолютного нуля, а до температуры Кюри  $\Theta$ , в котором добавка к температуре  $\Theta_p$  — некая температура, называемая парамагнитной точкой Кюри. Она близка к  $\Theta$ , но немного больше ее. Оказывается, что у ферромагнетиков закон Кюри должен быть заменён законом Кюри-Вейсса (1). Эта формула хорошо описывает поведение ферромагнитных веществ после их перехода в парамагнитную фазу при заметном удалении температуры от 0, но недостаточно точна при  $T \approx \Theta$ .

В нашей работе изучается температурная зависимость  $\chi(T)$  гадолиния при температурах выше точки Кюри. Выбор материала определяется тем, что его точка Кюри лежит в интервале комнатных температур.

Свяжем теперь периоды колебаний автогенератора с магнитной восприимчивостью. Связь самоиндукций катушки с магнитной восприимчивостью такова:

$$L - L_0 \propto \mu - 1 = \chi$$

А значит, с учетом формулы периода  $\tau = 2\pi\sqrt{LC}$ , получаем следующее соотношение:

$$\chi \propto \tau^2 - \tau_0^2$$

### 3. Проведение эксперимента

#### Начальные данные

Обозначим начальные данные нашей установки, для удобства, в виде таблицы.

$k$ , К/мВ	$\tau_0$ , мкс	$\sigma_U$ , мВ	$\sigma_{T_{\text{терм}}}$ , К	$\sigma_\tau$ , мкс
24	6.95636	0.012	0.01	0.01

**Табл. 1:** Начальные данные установки

Необходимо, чтобы разница температур между образцом и термостатом была не более половины градуса, то вычисляем максимальное напряжение термопары, при котором допустимо измерение:

$$U_{\text{max}} = \frac{(\Delta T)_{\text{max}}}{k} \approx 0.021 \text{ мВ}$$

Теперь снимем показания вольтметра и частометра при разных температурах термостата, повышая после каждого измерения температуру термостата на два градуса. При этом температуру образца будем считать по следующей формуле:

$$T = T_{\text{терм}} + kU$$

Причем погрешности считаются как:

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_{\text{терм}}^2 + (k\sigma_U)^2}$$

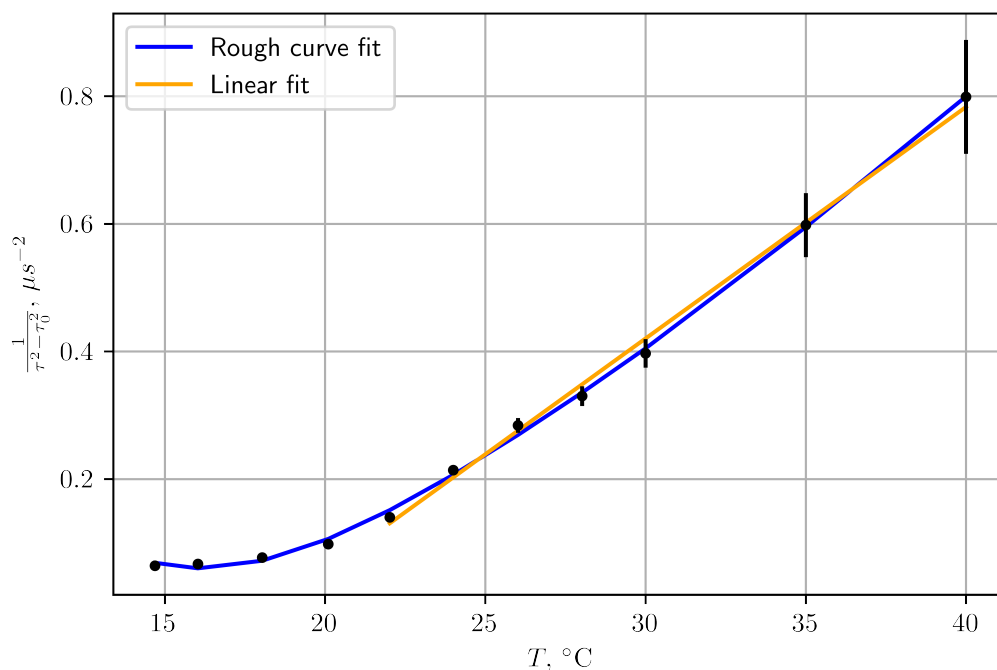
$$\sigma_{\frac{1}{\tau^2 - \tau_0^2}} = \frac{2\tau}{(\tau^2 - \tau_0^2)} \sigma_\tau$$

Результаты оформим в таблицу:

$i$	$T_{\text{терм}}, ^\circ\text{C}$	$U$ , мВ	$\tau$ , мкс	$T$ , $^\circ\text{C}$	$\frac{1}{\tau^2 - \tau_0^2}$ , $\text{мкс}^{-2}$
1	$14.76 \pm 0.01$	$-0.003 \pm 0.001$	$7.960 \pm 0.010$	$14.69 \pm 0.03$	$0.064 \pm 0.001$
2	$16.10 \pm 0.01$	$-0.003 \pm 0.001$	$7.910 \pm 0.010$	$16.03 \pm 0.03$	$0.067 \pm 0.001$
3	$18.11 \pm 0.01$	$-0.009 \pm 0.001$	$7.790 \pm 0.010$	$18.04 \pm 0.03$	$0.077 \pm 0.001$
4	$20.17 \pm 0.01$	$-0.010 \pm 0.001$	$7.610 \pm 0.010$	$20.10 \pm 0.03$	$0.098 \pm 0.002$
5	$22.09 \pm 0.01$	$-0.013 \pm 0.001$	$7.410 \pm 0.010$	$22.02 \pm 0.03$	$0.140 \pm 0.003$
6	$24.07 \pm 0.01$	$-0.013 \pm 0.001$	$7.240 \pm 0.010$	$24.00 \pm 0.03$	$0.214 \pm 0.007$
7	$26.09 \pm 0.01$	$-0.013 \pm 0.001$	$7.160 \pm 0.010$	$26.02 \pm 0.03$	$0.284 \pm 0.012$
8	$28.09 \pm 0.01$	$-0.006 \pm 0.001$	$7.130 \pm 0.010$	$28.02 \pm 0.03$	$0.330 \pm 0.016$
9	$30.07 \pm 0.01$	$-0.013 \pm 0.001$	$7.090 \pm 0.010$	$30.00 \pm 0.03$	$0.397 \pm 0.022$
10	$35.07 \pm 0.01$	$-0.012 \pm 0.001$	$7.013 \pm 0.010$	$35.00 \pm 0.03$	$0.598 \pm 0.050$
11	$40.07 \pm 0.01$	$-0.015 \pm 0.001$	$6.999 \pm 0.010$	$40.00 \pm 0.03$	$0.799 \pm 0.089$

**Табл. 2:** Проведение эксперимента

По полученным данным построим график зависимости  $\frac{1}{\tau^2 - \tau_0^2}(T)$ :



**Рис. 3:** График зависимости  $\frac{1}{\tau^2 - \tau_0^2}(T)$

При этом проведем линейную аппроксимацию части графика, близкой к линейной. Прямая задается уравнением  $y = kx + b$ , ее параметры:

$k, \mu s^{-2} K^{-1}$	$b, \mu s^{-2}$
$0.0363 \pm 0.0011$	$-0.6685 \pm 0.0326$

**Табл. 3:** Линейная аппроксимация

Таким образом, парамагнитная температура Кюри:

$$\Theta_p = \frac{-b}{k} = (18.48 \pm 0.95)^\circ\text{C} = (291.48 \pm 0.95)\text{K}$$

При этом погрешность конечного результата:

$$\sigma_{\Theta_p} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{k}\right)^2 + \left(\frac{b\sigma_k}{k^2}\right)^2}$$

## 4. Выводы

В ходе работы была исследована зависимость  $\frac{1}{\tau^2 - \tau_0^2}(T)$ , был построен график этой зависимости. Путем аппроксимации линейной части зависимости получена парамагнитная точка Кюри для гадо-линия:

$$\Theta_p = (18.48 \pm 0.95)^\circ\text{C} = (291.48 \pm 0.95)\text{K}$$

Результат хорошо согласуется с табличным значением точки Кюри  $\Theta = 19^\circ\text{C}$ .