

# Лабораторная работа 3.4.2

## Закон Кюри-Вейсса

29 ноября 2021 г.

Старченко Иван Александрович

**Цель работы:** изучение температурной зависимости магнитной восприимчивости ферромагнетика выше точки Кюри.

**Оборудование:** катушка самоиндукции с образцом из гадолиния, термостат, частотомер, цифровой вольтметр,  $LC$ -автогенератор, термопара медь-константан.

### Теоретическая часть

Вещества с отличными от нуля атомными магнитными моментами обладают парамагнитными свойствами. Внешнее магнитное поле ориентирует магнитные моменты, которые в отсутствие поля располагались в пространстве хаотичным образом. При повышении температуры  $T$  возрастает дезориентирующее действие теплового движения частиц, магнитная восприимчивость парамагнетиков убывает: в постоянном магнитном поле – по закону Кюри:

$$\chi = \frac{C}{T}, \quad \text{где } C \text{ — постоянная Кюри.} \quad (1)$$

Для парамагнитных веществ, которые при понижении температуры становятся ферромагнитными, формула (1) должна быть видоизменена. При  $T \rightarrow 0$  тепловое движение все меньше препятствует магнитным моментам атомов ориентироваться в одном направлении при сколь угодно слабом внешнем поле. В ферромагнетиках это происходит при температуре Кюри  $\Theta$ , при этом применяется закон Кюри-Вейсса:

$$\chi \sim \frac{1}{T - \Theta_p}, \quad \text{где } \Theta_p \text{ — температура, близкая к } \Theta.$$

Иногда  $\Theta_p$  называют парамагнитной, а  $\Theta$  – ферромагнитной точками Кюри.

В нашей работе изучается  $\chi(T)$  гадолиния при температурах выше точки Кюри, которая находится в интервале комнатных температур.

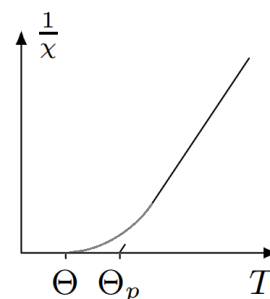


Рис. 1: Зависимость обратной величины магнитной восприимчивости от температуры

### Экспериментальная установка

Схема установки для проверки закона Кюри-Вейсса показана на рис. 2. Исследуемый образец расположен внутри катушки. Температура образца регулируется с помощью термостата.

Обозначим через  $L$  самоиндукцию катушки с образцом и через  $L_0$  – самоиндукцию в отсутствие образца. Получим:  $(L - L_0) \sim \chi$ . При изменении самоиндукции образца меняется период колебаний автогенератора:  $\tau = 2\pi\sqrt{LC}$ ,  $C$  – емкость контура автогенератора.

Период колебаний в отсутствие образца:  $\tau_0 = 2\pi\sqrt{L_0C}$ . Тогда имеем соотношение:  $(L - L_0) \sim (\tau^2 - \tau_0^2)$ . Таким образом,  $\chi \sim (\tau^2 - \tau_0^2)$ .

Далее следует, что закон Кюри-Вейсса справедлив, если выполнено соотношение:

$$\frac{1}{\chi} \sim (T - \Theta_p) \sim \frac{1}{\tau^2 - \tau_0^2}.$$

Разность температур исследуемого образца и воды в термопаре контролируется с помощью медно-константановой термопары и цифрового вольтметра. Один из спаев термопары находится в тепловом контакте с образцом, а другой погружен в воду. Концы термопары подключены к цифровому вольтметру.

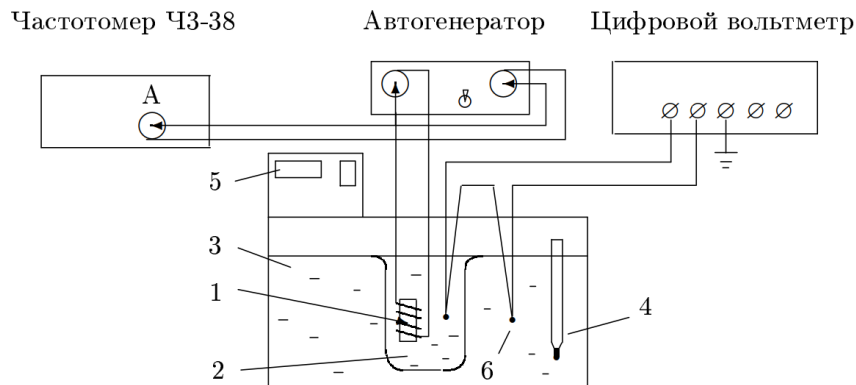


Рис. 2: Схема экспериментальной установки для проверки закона Кюри-Вейсса  
1 - катушка с образцом, 2 - стеклянный сосуд с трансформаторным маслом, 3 - вода в термостате, 4 - ртутные термометр, 5 - термостат, 6 - термопара

## Выполнение эксперимента

### Измерения

В работе исследуется зависимость периода колебаний автогенератора от температуры сердечника катушки, затем определяется парамагнитная точка Кюри гадолиния.

1. Запишем параметры установки:  $k = 24$  град/мВ,  $\tau_0 = 9,045$  мкс.
2. Исследуем зависимость периода колебаний  $LC$ -генератора от температуры образца, отмечая период колебаний  $\tau$  по частотомеру, а температуру образца  $T$  – по показаниям дисплея и цифровому вольтметру ( $\Delta U$  с учетом знака). Термопара подключена так, что при знаке "+" на табло вольтметра, температура образца выше температуры рабочей жидкости. Проведем измерения в диапазоне от  $14^\circ\text{C}$  до  $40^\circ\text{C}$  через  $2^\circ\text{C}$ . Результаты занесем в таблицу 1.

Для данной таблицы имеем погрешности:

$$\sigma(T_{\text{изм}}) = 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \sigma(\Delta U) = 1,2 \text{ мкВ} \quad \sigma(\tau) = 0,001 \text{ мкс}$$

$$\sigma(T) = \sqrt{\sigma(T_{\text{изм}})^2 + \sigma(k \cdot \Delta U)^2} = 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Также в таблицу 1 добавим расчеты значений  $(\tau^2 - \tau_0^2)$  и  $(\tau^2 - \tau_0^2)^{-1}$  с дальнейшей целью построить график  $\chi(T)$  и  $1/\chi(T)$ .

3. Как уже было отмечено, температура, при которой магнитная восприимчивость резко снижается, почти до нуля, носит название температуры Кюри –  $\Theta$ . При температурах выше  $\Theta$  процесс намагничивания ферромагнетика нарушается из-за интенсивного теплового движения атомов и молекул и материал перестает быть ферромагнитным и становится парамагнетиком.

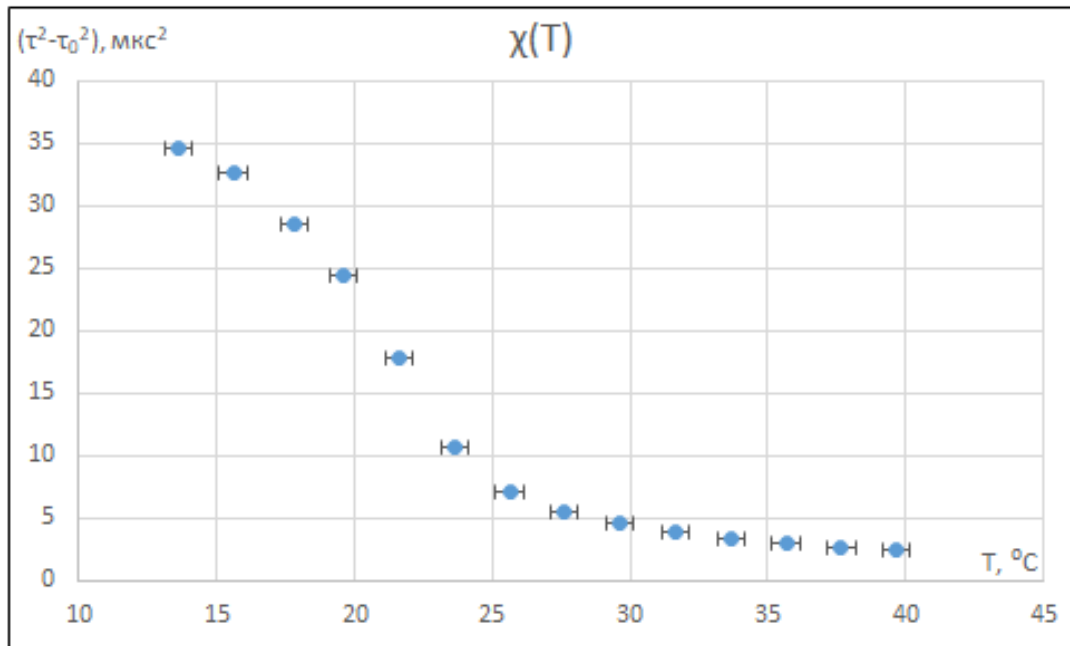


Рис. 3: График зависимости  $\chi(T)$ . Данные из таблицы 1.  
 $(\chi \sim (\tau^2 - \tau_0^2))$

Из графика  $\chi(T)$  (рис. 3) мы не можем определить точку Кюри  $\Theta$  для гадолиния. Для этого нужно было брать больший диапазон значений температуры, где был бы виден резкий скачок. Оттуда легко найти  $\Theta$ .

4. Теперь определим парамагнитную температуру Кюри для гадолиния из зависимости  $1/\chi(T)$ .

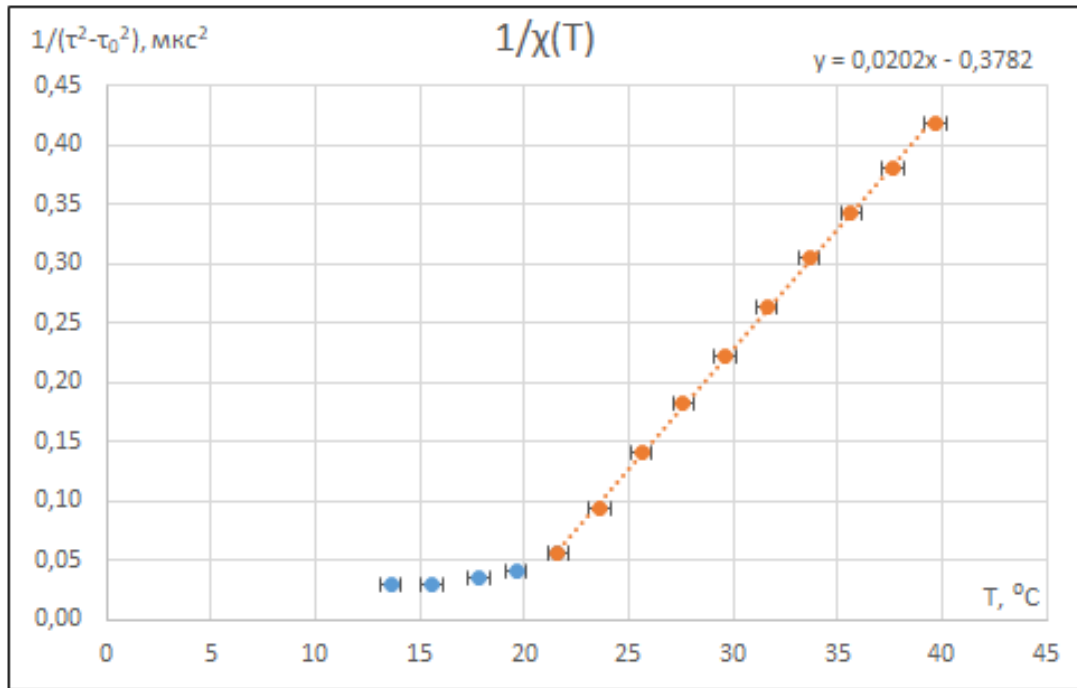


Рис. 4: График зависимости  $1/\chi(T)$ . Данные из таблицы 1.  
 $(\chi \sim (\tau^2 - \tau_0^2))$

Экстраполируя ту часть графика, где гадолиний ведет себя как парамагнетик, найдем  $\Theta_p$ . Рассмотрев данное линейное уравнение (также записано на рис. 4) найдем точку пересечения с осью абсцисс. Результат —  $18,7^{\circ}\text{C}$ .

Отметим, что для вычисленных значений  $(\tau^2 - \tau_0^2)$  относительная погрешность меньше  $\varepsilon < 0,1\%$ , а также для прямой ( $y = a + bx$ ) парамагнитной части кривой получаются коэффициенты:

$$\begin{cases} a = -0,3782 & \varepsilon = 0,3\% \\ b = 0,0202 & \varepsilon = 0,8\% \end{cases}$$

## Итоги

В данной работе исследована зависимость магнитной восприимчивости  $\chi$  гадолиния от температуры выше точки Кюри (табличная  $\Theta = 16^{\circ}\text{C}$ ). Также рассмотрена зависимость  $1/\chi(T)$ , откуда определена парамагнитная точка Кюри для гадолиния  $\Theta_p = (18,7 \pm 0,5)^{\circ}\text{C}$ . Относительная погрешность равна  $\varepsilon = 3\%$ , что вполне неплохо. Табличная  $\Theta_p = 20^{\circ}\text{C}$  для чистого гадолиния.

## Таблицы

N	1	2	3	4	5	6	7
$T_{\text{изм}}, ^\circ\text{C}$	14,03	16,03	18,00	20,02	22,02	24,02	26,02
$\Delta U, \text{мВ}$	-17,1	-18,0	-7,2	-17,1	-16,9	-16,1	-16,5
$T, ^\circ\text{C}$	13,6	15,6	17,8	19,6	21,6	23,6	25,6
$\tau, \text{мкс}$	10,790	10,701	10,509	10,310	9,980	9,612	9,430
$(\tau^2 - \tau_0^2)$	34,612	32,699	28,627	24,484	17,788	10,579	7,113
$(\tau^2 - \tau_0^2)^{-1}$	0,029	0,031	0,035	0,041	0,056	0,095	0,141

N	8	9	10	11	12	13	14
$T_{\text{изм}}, ^\circ\text{C}$	28,01	30,01	32,01	34,02	36,01	38,02	40,01
$\Delta U, \text{мВ}$	-17,0	-16,3	-16,0	-15,2	-14,7	-15,0	-14,0
$T, ^\circ\text{C}$	27,6	29,6	31,6	33,7	35,7	37,7	39,7
$\tau, \text{мкс}$	10,790	10,701	10,509	10,310	9,980	9,612	9,430
$(\tau^2 - \tau_0^2)$	5,480	4,492	3,787	3,270	2,920	2,626	2,387
$(\tau^2 - \tau_0^2)^{-1}$	0,182	0,223	0,264	0,306	0,342	0,381	0,419

Таблица 1: Результаты измерений для зависимости  $\tau(T)$ . Также данные для нахождения ферромагнитной и парамагнитной точек Кюри через графики  $\chi(T)$  и  $1/\chi(T)$ .