

## Лабораторная работа №3.4.2

### Закон Кюри - Вейсса

#### Цель работы :

Изучение температурных зависимостей магнитной восприимчивости ферромагнетизм выше точки Кюри.

#### В работе используются:

Катушка самоиндукции из гадолиния, термостат, частотомер, цифровой вольтметр, LC - автогенератор, термопара медь - константан.

#### Теоретические основы:

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 возрастает дезориентирующее действие теплового движения частиц, и магнитная восприимчивость парамагнетиков убывает, в простейшем случае (в постоянном магнитном поле – по закону Кюри:

ln[1]:= 
$$\chi = \frac{c}{T}$$

где  $c$  – постоянная Кюри.

Для парамагнитных веществ, которые при понижении температуры становятся ферромагнитными, формула [1] должна быть видоизменена. Эта формула показывает, что температура является особой точкой температурной кривой, в которой неограниченно возрастает.

При  $T \rightarrow 0$  тепловое движение всё меньше препятствует магнитным моментам атомов ориентироваться в одном направлении при сколь угодно слабом внешнем поле. В ферромагнетиках – под влиянием обменных сил – это происходит при понижении температуры не до абсолютного нуля, а до температуры Кюри  $\Theta$ . Оказывается, что у ферромагнетиков закон Кюри должен быть заменен законом Кюри - Вейсса:

ln[2]:= 
$$\chi \sim \frac{1}{T - \Theta_p}$$

где  $\Theta_p$  – температура, близкая к температуре Кюри.

Эта формула хорошо описывает поведение ферромагнитных веществ после их перехода в парамагнитную фазу при заметном удалении температуры от  $\Theta$ , но недостаточно точна при  $T \approx \Theta$ .

Иногда для уточнения формулы (2) вводят вместо одной две температуры Кюри, одна из которых описывает точку фазового перехода – ферромагнитная точка Кюри  $\Theta$ , а другая является параметром в формуле (2) – парамагнитная точка Кюри  $\Theta_p$  (рис. 1).

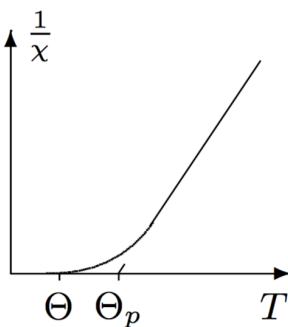


Рис. 1. Зависимость обратной величины магнитной восприимчивости от температуры.

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.

### Экспериментальная установка.

Схема установки для проверки закона Кюри - Вейсса показана на рис. 2. Исследуемый ферромагнитный образец (гадолиний) расположен внутри пустотелой катушки самоиндукции, которая служит индуктивностью колебательного контура, входящего в состав LC-автогенератора. Автогенератор собран на полевом транзисторе КП-103 и смонтирован в виде отдельного блока.

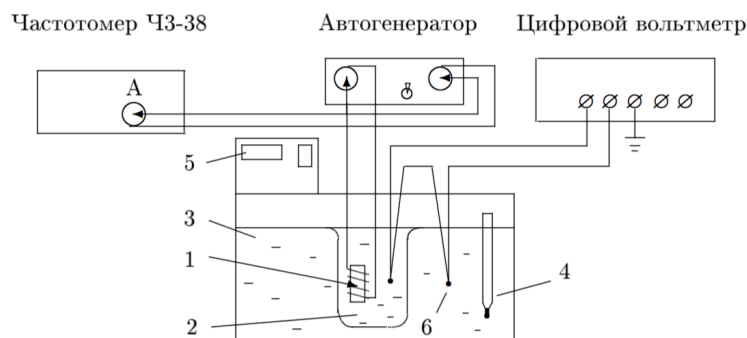


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

Гадолиний является хорошим проводником электрического тока, а рабочая частота генератора достаточно велика ( $\sim 50$  кГц), поэтому для уменьшения вихревых токов образец изготовлен из мелких кусочков размером около 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. Температура образца регулируется с помощью термостата.

Магнитная восприимчивость образца определяется по изменению самоиндукции катушки. Обозначив через  $L$  самоиндукцию катушки с образцом и через  $L_0$  – её самоиндукцию в отсутствие образца, получим:

$$(L - L_0) \sim \chi$$

При изменении самоиндукции образца меняется период колебаний автогенератора:

$$\tau = 2\pi\sqrt{LC} \quad \text{In[3]:=}$$

где  $C$  – ёмкость контура автогенератора.

Период колебаний в отсутствие образца определяется самоиндукцией пустой катушки:

$$\tau_0 = 2\pi\sqrt{L_0C} \quad \text{In[4]:=}$$

Отсюда имеем:

$$(L - L_0) \sim (\tau^2 - \tau_0^2)$$

Таким образом,

$$\chi \sim (\tau^2 - \tau_0^2)$$

Из формул (2) и (6) следует, что закон Кюри - Вейсса справедлив, если выполнено соотношение:

$$\frac{1}{\chi} \sim (T - \Theta_p) \sim \frac{1}{(\tau^2 - \tau_0^2)} \quad \text{In[5]:=}$$

Измерения проводятся в интервале температур от 14°C до 40°C. С целью экономии времени следует начинать измерения с низких температур.

Для охлаждения образца используется холодная водопроводная вода, циркулирующая вокруг сосуда с рабочей жидкостью (дистиллированной водой); рабочая жидкость постоянно перемешивается.

Величина стабилизирующей температуры задается на дисплее 5 термостата. Для нагрева служит внутренний электронагреватель, не показанный на рисунке. Когда температура рабочей жидкости в сосуде приближается к заданной, непрерывный режим работы нагревателя автоматически переходит в импульсный – начинается процесс стабилизации температуры.

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 медно-константановой 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.

#### Задание

1. Подготовим приборы к работе.
2. Оценим допустимую ЭДС термопары, если допустимая разность температур образца и рабочей жидкости  $\Delta T = 0,5^\circ\text{C}$ , а постоянная термопары  $k = 24$  град/мВ.

$$\Delta U = \frac{0.5}{24} = 2.08333 \times 10^{-2} \text{ мВ} / ^\circ\text{C} \approx 21 \text{ мкВ} / ^\circ\text{C}$$

3. Исследуем зависимость периода колебаний LC-генератора от температуры образца, отмечая период колебаний  $\tau$  по частотомеру, а температуру  $T$  – 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.

$T, ^\circ\text{C}$	$\Delta U, \text{ мВ}$	$\tau, \text{ мкс}$
12.73	0.002	10.8325
14	-0.014	10.8046
16.1	-0.001	10.6618
17.99	-0.005	10.495
20.12	-0.003	10.1451
22.05	-0.006	9.795
24.04	-0.012	9.537
26.04	-0.013	9.403
28.04	-0.012	9.327
30.05	-0.008	9.28
32.05	-0.007	9.242
34.02	-0.013	9.221
36.	-0.015	9.203
38.02	-0.013	9.187
40.	-0.014	9.176

Out[233]=

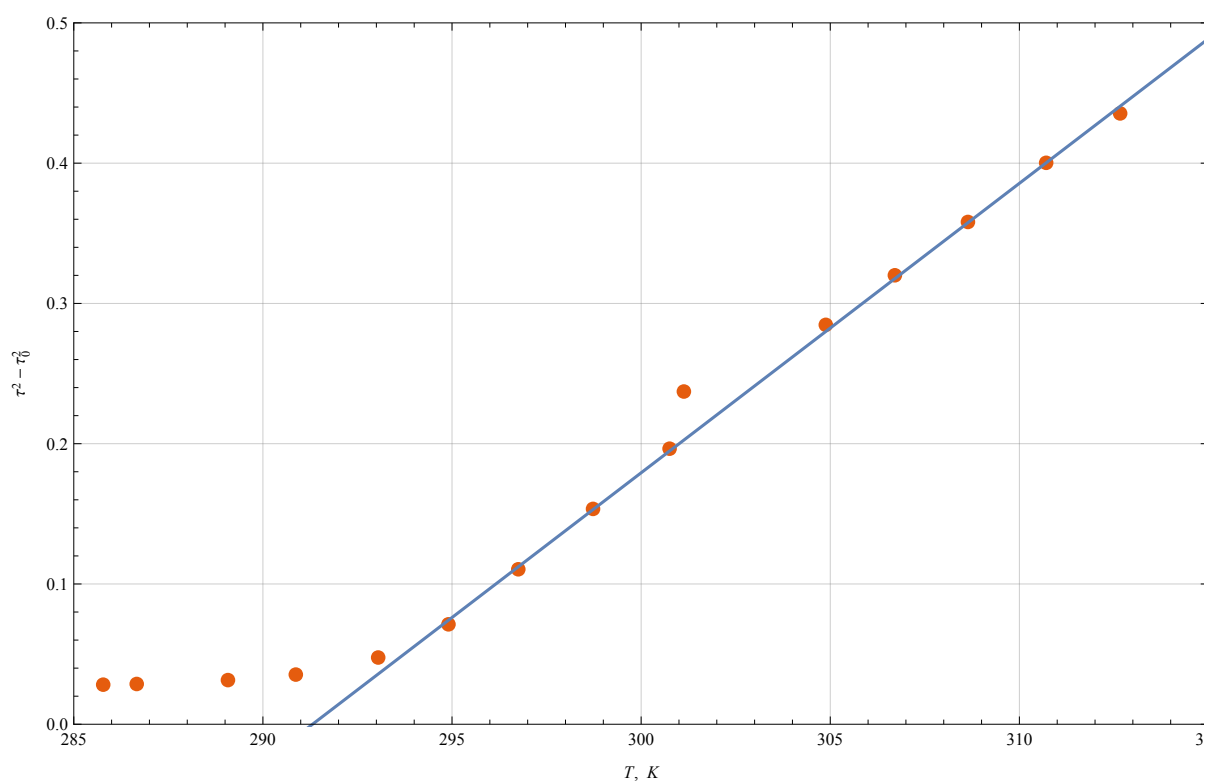
- 4 Построим график зависимости  $f(T) = \frac{1}{(\tau^2 - \tau_0^2)}$

$$\tau_0 = 9.050$$

T, K	f(T)
285.778	0.0282163
286.664	0.0287052
289.076	0.0314748
290.87	0.0354065
293.048	0.0475725
294.906	0.0712275
296.752	0.110474
298.728	0.153518
300.752	0.196447
301.13	0.237197
304.882	0.284733
306.708	0.320067
308.64	0.358075
310.708	0.400245
312.664	0.43545

Out[346]=

Out[700]=



Определим параметры графика, воспользовавшись методом наименьших квадратов:

Out[340]=  $-6.01127 + 0.0206351 x$ 

		Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
Out[336]=	1	-6.01127	0.0532307	-112.929	$1.12566 \times 10^{-12}$
	x	0.0206351	0.000175148	117.815	$8.3691 \times 10^{-13}$

Рассчитаем значение  $\Theta_p$  и  $\sigma_{\Theta_p}$ :

$$\Theta_p = -\frac{b}{a} = 18.3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\sigma_{\Theta} = 0.01$$

$$\Theta_p = (18.3 \pm 0.2) ^\circ\text{C}$$

**Вывод:** исследовали поведение гадолиния при температуре выше температуры Кюри, убедились в выполнении для ферромагнитных веществ закона Кюри - Вейсса. Экспериментально для гадолиния

вычислили точку Кюри  $\Theta_p = (18.3 \pm 0.2)^\circ\text{C}$ , что близко к табличному значению  $\Theta_p = 16^\circ\text{C}$ .