**Работа 3.4.2**

Закон Кюри—Вейсса

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

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

Вещества с отличными от нуля атомными магнитными моментами обладают парамагнитными свойствами. Внешнее магнитное поле ориен­тирует магнитные момент, которые в отсутствие поля располагались в пространстве хаотичным образом.

При повышении температуры *Т* возрастает дезориентирующее дей­ствие теплового движения частиц, и магнитная восприимчивость па­рамагнетиков убывает, в простейшем случае (в постоянном магнитном поле) — по закону Кюри:

**(1)**



где *С —* постоянная Кюри.



Для парамагнитных веществ, которые при понижении температуры становятся ферромагнитными, формула (1) должна быть видоизмене­на. Эта формула показывает, что температура *Т =* 0 является особой точкой температурной кривой, в которой *х* неограниченно возрастает. При *Т* —*>* 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 θ. Для ферромагнетиков закон Кюри дол­жен быть заменён законом Кюри-Вейсса:

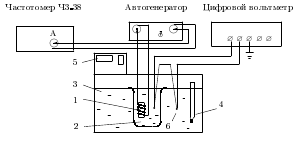
χ~ (1)

где *θр —* температура, близкая к температуре Кюри.

Эта формула хорошо описывает поведение ферромагнитных ве­ществ после их перехода в парамагнитную фазу при заметном удалении температуры от θ, но недостаточно точна при *Т* ~θ .

Иногда для уточнения формулы (2) вводят вместо одной две темпе­ратуры Кюри, одна из которых описывает точку фазового перехода — ферромагнитная точка Кюри θ, а другая является параметром в фор­муле (2) — парамагнитная точка Кюри — *θр* (рис. 1).

В нашей работе изучается температурная зависимость χ(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. 

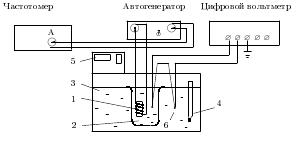


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Гадолиний является хорошим проводником электрического тока, а рабочая частота генератора достаточно велика (~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 прибли­жённой оценки температуры. Температура образца регулируется с по­мощью термостата.

Магнитная восприимчивость образца *χ* определяется по изменению самоиндукции катушки. Следует отметить,что восприимчивость образца отличается от восприимчивости гадолиния из-за достаточно большого размагничивающего коэффициента. Обозначив через *L* самоиндукцию катушки с образцом и через *L0 —* её самоиндукцию в отсутствие образца, по­лучим

*(L –* L0) ~ χ (3)

При изменении самоиндукции образца меняется период колебаний ав­тогенератора:

*,* (4)

где *С —* ёмкость контура автогенератора.

Период колебаний в отсутствие образца определяется самоиндукци­ей пустой катушки:

*.* (5)

Из (4) и (5) имеем

(L*-L0)~*

Таким образом,

**~** **(6)**

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

**(7)**

χ~(T-θp)~

Измерения проводятся в интервале температур от 14 °С до 40 °С. 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 стабилизируемой температуры задаётся 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 (нагреватель то включается, то выключается) — начинается процесс стабилизации температуры.

Измерения проводятся в интервале температур от 14 °С до 40 °С. 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 стабилизируемой температуры задаётся 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 (нагреватель то включается, то выключается) — 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. Чувствительность термопары указана на установке. Реко­мендуется измерять период колебаний автогенератора в тот момент, когда указанная разность температур становится меньше 0,5 °С (более точному измерению температур мешают паразитные ЭДС, возникаю­щие в цепи термопары).

ЗАДАНИЕ

В работе предлагается исследовать зависимость периода колебаний автогенератора от температуры сердечника катушки и по результатам измерений определить парамагнитную точку Кюри гадолиния.

1. Подготовьте приборы к работе.

Оцените допустимую ЭДС термопары, если допустимая разность тем­ператур образца и рабочей жидкости *ΔT =* 0,5 °С, а постоянная термо­пары *к =* 24 град/мВ;

2. Исследуйте зависимость периода колебаний LC-генератора от темпе­ратуры образца, отмечая период колебаний *τ* по частотомеру, а тем­пературу *Т* — по показаниям дисплея и цифровому вольтметру (ΔUс учётом знака). Термопара подключена так, что при знаке «+» на таб­ло вольтметра температура образца выше температуры рабочей жид­кости.

Проведите измерения в диапазоне от 14 °С до 40 °С через 2°С. Запишите период колебаний τ0 без образца, указанный на установке.

3. Закончив измерения, охладите термостат, руководствуясь техниче­ским описанием.

Обработка результатов

1. Рассчитайте температуру *Т* образца с учётом показаний термопары.  
   Постройте график зависимости 1/(τ2-τ02)= *f(T).* Экстраполируя

по­лученную прямую к оси абсцисс, определите парамагнитную точку Кю­ри *θр* для гадолиния.

1. Оцените погрешности эксперимента и сравните результат с табличным.

**Контрольные вопросы**

1. Как объяснить явления пара- и диамагнетизма с молекулярной точки зре­ния?
2. Чем отличаются пара- и ферромагнетики в отсутствие магнитного поля?
3. Сформулируйте общий физический принцип, объясняющий явление диа­магнетизма.
4. Качественно изобразите на одном графике *В(Н)* для пара-, диа- и ферро­магнетика.

5\* Какой вклад в магнитную восприимчивость образца вносит проводимость гадолиния? Как связан этот вклад с размером крупинок, частотой и удельной проводимостью? Зависит ли этот вклад от температуры? Оцените этот вклад для крупинок размером 0,5 мм. Обратите внимание на рис.1, на котором кривая около точки Кюри идёт практически горизонтально, не опускаясь до нуля. Оцените глубину проникания магнитного поля около точки Кюри, считая магнитную проницаемость и проводимость примерно такими же, как у железа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сивухин Д-В.* Общий курс физики. Т. III. Электричество. — М.: Наука,  
   1983. §§ 74, 79.
2. *Калашников С.Г.* Электричество. — М.: Наука, 1977. §§ 110, 111, 119.