**Работа 3.4.1**

Диа- и парамагнетики

**Цель работы:** измерение магнитной восприимчивости диа- и пара­магнитного образцов.

**В работе используются:** электромагнит, аналитические весы, милливеберметр, регулируемый источник постоянного тока, образцы.

Магнитная восприимчивость тел может быть определена методом измерения сил, которые действуют на тела в магнитном поле. Суще­ствуют два классических метода таких измерений: *метод Фарадея* и *метод Гюи.* В методе Фарадея исследуемые образцы, имеющие форму маленьких шариков, помещаются в область сильно неоднородного маг­нитного поля и измеряется сила, действующая на образец. При этом для расчёта магнитной восприимчивости необходимо знать величину градиента магнитного поля в месте расположения образца. В методе Гюи используется тонкий и длинный стержень, один из концов которо­го помещают в зазор электромагнита (обычно в область однородного поля), а другой конец — вне зазора, где величиной магнитного поля можно пренебречь. Закон изменения поля — от максимального до ну­левого — в этом случае несущественен. Найдём выражение для магнитной силы, действующий на такой образец (рис.1). Пусть площадь образца равна s, его магнитная проницаемость μ, а поле в зазоре равно B. Воспользуемся для расчёта энергетическими соображениями. Магнитная сила может быть вычислена как производная от магнитной энергии по перемещению. Из теории известно (см.[1]), что эту производную надо брать со знаком минус, когда постоянен поток (например, постоянный магнит), или со знаком плюс при постоянном токе.



Рис. 1.Расположение

образца в зазоре

электромагнита.



Найдём выражение для магнитной силы, дей­ствующей на такой образец (рис. 1). Пусть пло­щадь образца равна s, его магнитная проницае­мость — μ, а поле в зазоре равно *В.*



При смещении образца на расстояние Δ*l* вниз магнитная сила, дей­ствующая на него, равна



где *ΔWm —* изменение магнитной энергии системы при постоянном токе в обмотке электромагнита и, следовательно, при постоянной величине магнитного поля в зазоре.

Магнитная энергия рассчитывается по формуле



где интеграл распространён на всё пространство. При смещении образ­ца магнитная энергия меняется только в области зазора (в объёме пло­щади *s* и высоты Д/), а около верхнего конца стержня остаётся неизмен­ной, поскольку магнитного поля там практически нет. Принимая поле внутри стержня равным измеренному нами полю в зазоре В, получим



Следовательно, на образец действует сила



Знак силы, действующей на образец, зависит от знака χ:образцы из па­рамагнитных материалов (χ > 0) втягиваются в зазор электромагнита, а диамагнитные образцы (χ < 0) выталкиваются из него.

Пренебрегая отличием *μ* от единицы, получаем окончательно рас­чётную формулу в виде



Cледует отметить, что здесь нужно было бы учесть отличие поля в образце от поля в зазоре, хотя в нашем случае пренебрежимо мало. В приложении приведено решение этой задачи

.Измерив силу, действующую на образец в магнитном поле В, можно рассчитать магнитную восприимчивость образца.

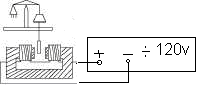


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

**Экспериментальная установка.** Схема установки изображена на рис. 2. Магнитное поле с максимальной индукцией ~1,5 Тл создаётся в зазоре электромагнита, питаемого постоянным током. Диаметр полю­сов существенно превосходит ширину зазора, поэтому поле в средней части зазора достаточно однородно. Величина тока, проходящего через обмотки электромагнита, задаётся регулируемым источником постоянного напряжения с цифровым амперметром.

Градуировка электромагнита (связь между индукцией магнитного поля *В* в зазоре электромагнита и силой тока I в его обмотках) про­изводится при помощи милливеберметра (описание милливеберметра и правила работы с ним приведены на с. 148).

При измерениях образцы поочерёдно подвешиваются к аналитиче­ским весам так, что один конец образца оказывается в зазоре электро­магнита, а другой — вне зазора, где индукцией магнитного поля можно

пренебречь. При помощи аналитических весов определяется перегруз­ка *ΔР = F —* сила, действующая на образец со стороны магнитного поля.

Как уже отмечалось, силы, действующие на диа- и парамагнитные образцы, очень малы. Небольшие примеси ферромагнетиков (сотые до­ли процента железа или никеля) способны кардинально изменить ре­зультат опыта, поэтому образцы были специально отобраны. Ток через электромагнит нужно менять только при арретированных весах,так как образцы имеют хорошую проводимость, и токи Фуко мешают измерениям.

ЗАДАНИЕ

В работе предлагается исследовать зависимость силы, действующей на образец, размещённый в зазоре электромагнита, от величины поля в зазоре и по результатам измерений рассчитать магнитную восприим­чивость меди и алюминия.

1. Проверьте работу цепи питания электромагнита. Оцените диапазон  
   изменения тока I через обмотки.
2. Прокалибруйте электромагнит. Для этого с помощью милливебермет-  
   ра снимите зависимость магнитного потока Ф, пронизывающего проб­  
   ную катушку, находящуюся в зазоре, от тока *I (Ф = BSN).* Значение  
   *SN* (произведение площади сечения пробной катушки на число витков  
   в ней) указано на установке.

**Включать и отключать электромагнит следует только при минимальном токе.**

3. Убедитесь, что весы арретированы1.

**Весы следует арретировать перед каждым изменением тока.**

4. Измерьте силы, действующие на образец в магнитном поле. Для это­  
го, не включая электромагнит, подвесьте к весам один из образцов.  
Установите на весах примерное значение массы образца (масса, диа­  
метр и максимальное значение перегрузки для каждого образца ука­заны на установке). Освободите весы и добейтесь точного равновесия весов.

Арретируйте весы. Установите минимальное значение тока и прове­дите измерение равновесного значения массы.

Повторите измерения m = *f(I)* для 6-8 других значений тока.



1 Арретир (фр. arreter — фиксировать) — приспособление для закрепления чув­ствительного элемента измерительного прибора в нерабочем состоянии.

5. Повторите измерения п. 4 для другого образца.

Обработка результатов

1. Рассчитайте поле *В* и постройте градуировочную кривую для элек­  
   тромагнита: *В =(I*).
2. Постройте на одном листе графики |ΔР| = *f(B)* для меди и алюми­-  
   ния.
3. По наклонам полученных прямых рассчитайте величину *χ с*  помо-­  
   щью формулы (4).
4. Оцените погрешности измерений и сравните результаты с табличны-­  
   ми значениями.

**Контрольные вопросы**

1. Объясните суть метода измерения магнитной восприимчивости.
2. Напишите выражения для магнитной силы, действующей на образец, по-­  
   мещённый в неоднородное магнитное поле.
3. Как можно убедиться в однородности или неоднородности магнитного поля  
   в зазоре электромагнита?
4. Как проверить экспериментально, влияет ли намагниченность весов на ре­-  
   зультаты измерения магнитной восприимчивости?
5. Пусть у вас используется образец в виде тонкой и длинной полосы, находящейся между полосами магнита. В первом случае плоскость образца перпендикулярна линиям магнитной индукции, во втором – параллельна. Будет ли действующая на образец сила отличаться в этих двух случаях?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сивухин Д-В.* Общий курс физики. Т. III. Электричество. — М.: Наука,  
   1983. §§ 61, 75-77.
2. *Калашников С.Г.* Электричество. — М.: Наука, 1977. Гл. XI, §§ 109, 117,  
   118.
3. *Кингсеп А.С, Локшин Г.Р., Ольхов О.А.* Основы Физики. Т. 1. Механика,  
   электричество и магнетизм, колебания и волны, волновая оптика. — М.: Физ-  
   матлит, 2001. Ч. II, гл. 5, § 5.2.