

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа прикладной математики и информатики

Отчёт о выполнении лабораторной работы

3.4.1

Диа- и парамагнетики

Соболевский Федор Александрович
Б05-111

Ноябрь 2022

1 Аннотация

В данной работе были исследованы магнитные свойства диа- и парамагнетиков на примере образцов из различных металлов и графита. Были измерены значения магнитной восприимчивости материалов образцов. На основе измерений были сделаны выводы о магнитных свойствах диа- и парамагнетиков.

2 Теоретические сведения

2.1 Определение магнитной восприимчивости

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 несуществен.

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 B .

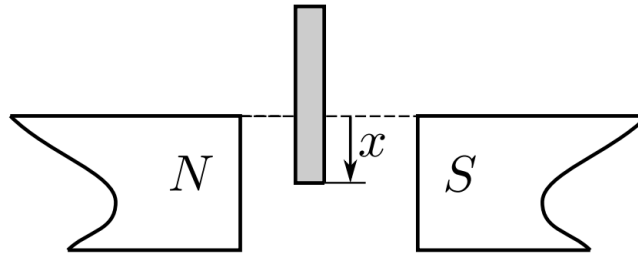


Рис. 1: Расположение образца в зазоре электромагнита

Воспользуемся для расчёта энергетическими соображениями. Магнитная сила может быть вычислена как производная от магнитной энергии по перемещению. Данную производную следует брать со знаком минус, когда образец находится в поле постоянного магнита, или со знаком плюс, как в нашем случае, когда поле в зазоре создаётся электромагнитом, ток I в обмотках которого поддерживается постоянным.

При смещении образца на расстояние Δl вниз магнитная сила, действующая на него, равна

$$F = \left(\frac{\Delta W_m}{\Delta l} \right)_I,$$

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

Магнитная энергия рассчитывается по формуле

$$W_m = \frac{1}{2} \int H B dV = \frac{1}{2\mu_0} \int \frac{B^2}{\mu} dV,$$

где интеграл распространён на всё пространство. При смещении образца магнитная энергия меняется только в области зазора (в объёме площади s и высоты Δl), а около верхнего конца

стержня остаётся неизменной, поскольку магнитного поля там практически нет. Принимая поле внутри стержня равным измеренному нами полю в зазоре B , получим

$$\Delta W_m = \frac{1}{2\mu_0} \frac{B^2}{\mu} s \Delta l - \frac{1}{2\mu_0} B^2 s \Delta l = -\frac{\chi}{2\mu_0 \mu} B^2 s \Delta l.$$

Следовательно, на образец действует сила

$$F = -\frac{\chi}{2\mu_0 \mu} B^2 s.$$

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

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

$$F = -\frac{\chi B^2 s}{2\mu_0}. \quad (1)$$

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

2.2 Экспериментальная установка

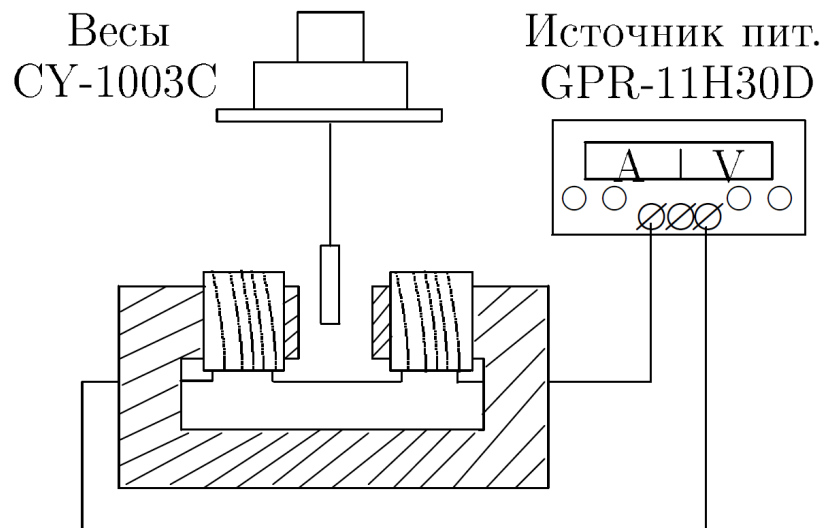


Рис. 2: Схема экспериментальной установки.

Магнитное поле с максимальной индукцией $\simeq 1$ 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 питания GPR и измеряется амперметром A , встроенным в источник питания. Градуировка электромагнита (связь между индукцией магнитного поля B в зазоре электромагнита и силой тока I в его обмотках) производится при помощи милливеберметра.

При измерениях образцы поочерёдно подвешиваются к весам так, что один конец образца оказывается в зазоре электромагнита, а другой – вне зазора, где индукцией магнитного поля можно пренебречь. При помощи весов определяется перегрузка $\Delta P = F$ – сила, действующая на образец со стороны магнитного поля.

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.

3 Оборудование и инструментальные погрешности

В работе использовались: электромагнит, аналитические весы, миллибеберметр, магнитометр, регулируемый источник постоянного тока, образцы из меди, вольфрама, алюминия.

Инструментальные погрешности:

- Амперметр: $\Delta_I = 0,01$ А;
- Миллибеберметр: $\Delta_{B_1} = 0,1$ мВб;
- Магнитометр: $\Delta_B = 5$ Тл;
- Весы: $\Delta_m = 0,5$ мг.

В работе для измерения индукции магнитного поля использован магнитометр, так как миллибеберметр даёт большую, чем у магнитометра, относительную погрешность измерений.

4 Результаты измерений и обработка экспериментальных данных

4.1 Градуировка электромагнита

Перед проведением опыта была проведена градуировка магнита. С помощью магнитометра было измерено значение магнитной индукции между полюсами электромагнита в зависимости от тока с шагом в 0,5 А. Результаты измерений представлены в таблице 1.

I , А	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
B , Гс	1755	3181	4696	6106	7309	8291

Таблица 1: Зависимость индукции магнитного поля катушки от силы тока в ней

4.2 Измерение сил, действующих на образцы в магнитном поле

Для четырех образцов из меди, вольфрама, алюминия и графита соответственно были измерены силы F , действующей на образец при различных токах в обмотках электромагнита. Величина данной силы определялась как разность ΔP между весом груза при отключенном электромагните и при данном токе через него. Результаты измерений представлены в таблице 2. Зависимость величины силы от индукции магнитного поля представлена на рис. 3 и 4.

I , А	B , Гс	$\Delta P_{Cu}/g$, мг	$\Delta P_W/g$, мг	$\Delta P_{Al}/g$, мг	$\Delta P_C/g$, мг
0,5	1755	-1	0	2	-33
1,0	3181	-3	2	6	-80
1,5	4696	-7	4	14	-133
2,0	6106	-11	8	24	-186
2,5	7309	-17	12	35	-268
3,0	8291	-22	17	46	-315

Таблица 2: Результаты измерений сил, действующих на образцы в магнитном поле

По графику зависимости отклоняющей силы для графита видно, что погрешность её измерения очень велика. Это связано с тем, что при включении достаточно сильного поля образец

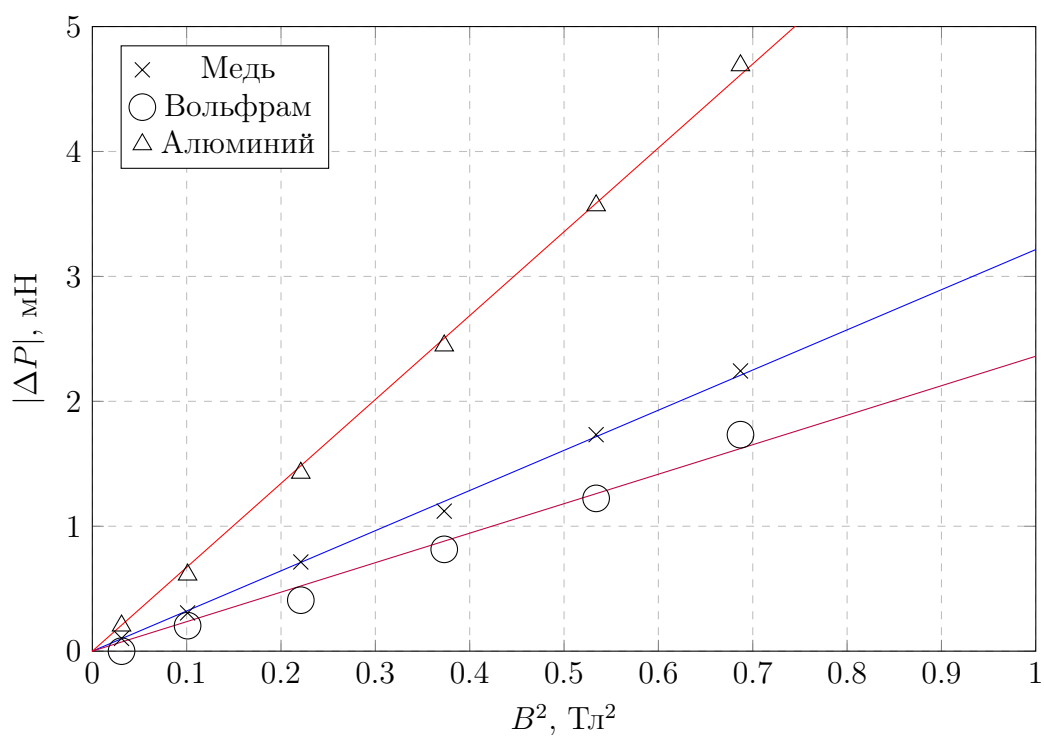


Рис. 3: Графики зависимостей сил, действующих на металлические образцы, от величины поля

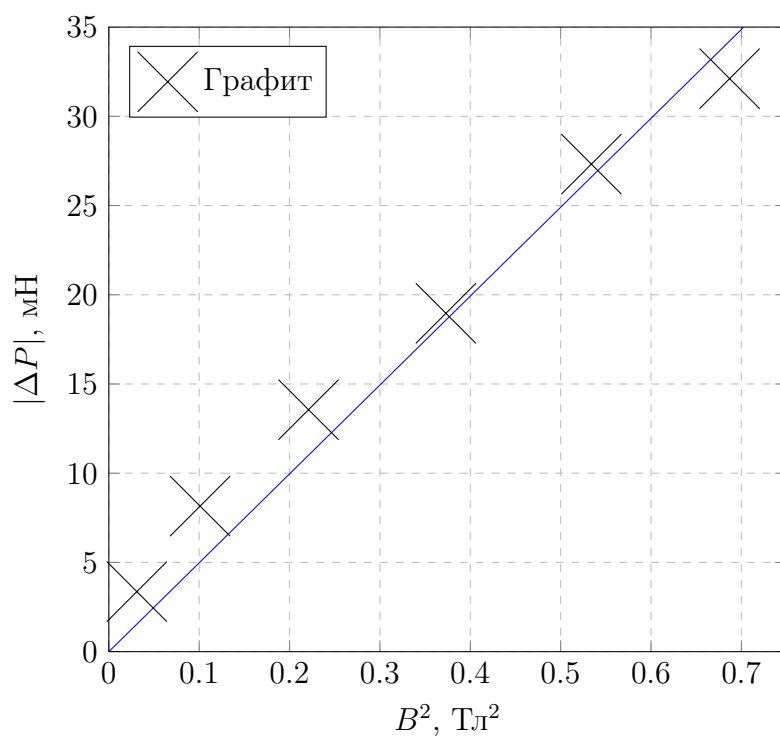


Рис. 4: Графики зависимости силы, действующей на образец из графита, от величины поля

притягивался к одной из стенок зазора в электромагните, и весы фиксировали неточные значения вследствие наличия трения между образцом и стенкой.

Значения коэффициентов наклона $k = d(\Delta P)/d(B^2)$ следующие:

- **Медь:** $k_{\text{Cu}} = -3,2 \pm 0,3 \text{ мН/Тл}^2$;
- **Вольфрам:** $k_{\text{W}} = 2,4 \pm 0,3 \text{ мН/Тл}^2$;
- **Алюминий:** $k_{\text{Al}} = 6,7 \pm 0,4 \text{ мН/Тл}^2$;
- **Графит:** $k_{\text{C}} = -49,8 \pm 4,8 \text{ мН/Тл}^2$.

4.3 Расчёт величины магнитной восприимчивости

Согласно формуле (1), вычислим коэффициент магнитной восприимчивости χ для каждого образца. Из этой формулы следует, что

$$k = \frac{\chi s}{2\mu_0}.$$

Отсюда

$$\chi = \frac{2\mu_0 k}{s}$$

где s – площадь поперечного сечения исследуемых образцов. В нашем случае $s = (0,78 \pm 0,02) \text{ см}^2$ для всех образцов. Получены следующие значения магнитной восприимчивости:

- **Медь:** $\chi_{\text{Cu}} = -(1,03 \pm 0,08) \cdot 10^{-5}$;
- **Вольфрам:** $\chi_{\text{W}} = (0,76 \pm 0,06) \cdot 10^{-5}$;
- **Алюминий:** $\chi_{\text{Al}} = (2,16 \pm 0,18) \cdot 10^{-5}$;
- **Графит:** $\chi_{\text{C}} = -(16,0 \pm 1,5) \cdot 10^{-5}$.

5 Обсуждение результатов и выводы

В ходе данной работы была измерена магнитная восприимчивость диа- и пара- магнетиков. Были исследованы образцы из меди, вольфрама, алюминия и графита. Табличные значения измеренных величин представлены в таблице 3. Полученные экспериментально значения для металлов совпадают с табличными в пределах погрешностей. Исходя из результатов эксперимента можно сказать, что алюминий и вольфрам являются парамагнетиками ($\chi > 0$), а медь в свою очередь – диамагнетиком ($\chi < 0$). Значение для графита также близко к табличному, однако относительная погрешность определения магнитной восприимчивости в данном случае выше, чем для остальных образцов. Исходя из эксперимента, графит также является диамагнетиком.

Материал	Медь	Вольфрам	Алюминий	Графит
Измеренное значение, 10^{-5}	$-1,03 \pm 0,08$	$0,76 \pm 0,06$	$2,16 \pm 0,18$	$-16,0 \pm 1,5$
Табличное значение, 10^{-5}	-0,96	0,64	2,2	-14

Таблица 3: Измеренные и теоретические значения магнитной восприимчивости

Таким образом, описанный выше метод измерения магнитной проницаемости материалов является рабочим и позволяет с хорошей точностью определить эту величину для различных

исследуемых образцов. Используемая экспериментальная установка обеспечивает высокую точность при измерении магнитной восприимчивости металлов; для повышения точности измерений для графита следует сделать зазор между обкладками электромагнита больше либо взять меньший по толщине или больший по массе образец графита.