

Отчет о выполнении лабораторной работы 3.4.1

Диа- и парамагнетики

Комкин Михаил, группа Б01-303

2 ноября 2024 г.

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

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

Теория

Магнитная восприимчивость тел может быть определена по измерению сил, действующих 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. В данной работе предлагается использовать метод Гюи.

Найдём выражение для силы, действующей со стороны магнитного поля на цилиндрический стержень, помещённый в зазор электромагнита (рис. 1). Пусть площадь сечения образца равна S , его магнитная проницаемость — μ , поле в зазоре равно B_0 и образец помещён в зазор на глубину x .

Ток в обмотке электромагнита I поддерживается постоянным, поэтому согласно (4.28) внешняя сила, необходимая для удержания образца в магнитном поле, равна производной магнитной энергии системы по координате. Нас интересует сила, действующая на образец со стороны магнитного поля, поэтому изменим знак (4.28) на противоположный:

$$F_M = \left(\frac{\partial W_M}{\partial x} \right)$$

где $W_M(x)$ — магнитная энергия системы при $I = \text{const}$ (то есть при $B_0 = \text{const}$) в зависимости от смещения образца x .

Магнитная энергия, с учётом выражения (4.25) для её объёмной плотности, может быть рассчитана по формуле:

$$W_M = \frac{1}{2\mu_0} \int \frac{B^2}{\mu} dV, \quad (2)$$

где интеграл распространяем на всё пространство.

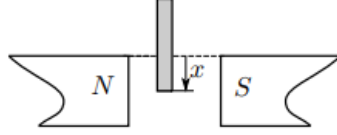


Рис. 1: Расположение образца в зазоре электромагнита

Найдём распределение магнитного поля в длинном цилиндре, частично помещённом в зазор электромагнита.

Сначала решим промежуточную задачу: рассмотрим бесконечный стержень с проницаемостью μ , помещённый в перпендикулярное ему однородное магнитное поле B_0 , направленное вдоль оси x . Найдём для него распределение поля B в образце. В предположении магнитных параметров поля $|\vec{H}| \ll \mu H$, можно воспользоваться непрерывностью касательной компоненты H и считать, что в образце $H_{text} = H_0$, следовательно, $B_{text} = \mu B_0$.

Вернёмся к задаче о цилиндре в электромагните. Систему можно условно разбить на 3 части (см. рис. 2). В области I вне электромагнита поле мало, вкладом в энергию можно пренебречь. В области II, внутри электромагнита, поле приближенно равно $B_2 \approx B_0$. В области III, вне электромагнита, поле также ослабевает. Найдём в пограничных областях между I и II, и между II и III.

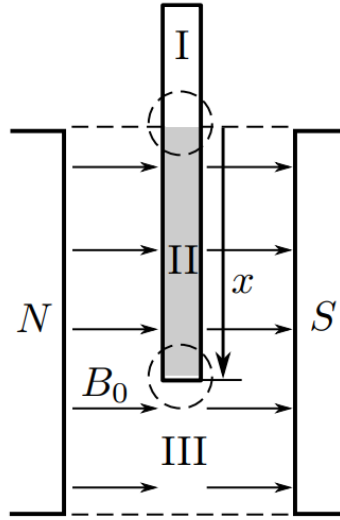


Рис. 2: К вычислению распределения магнитного поля.

При смещении стержня вдоль электромагнита на некоторое расстояние Δz изменяется объём в области II на $\Delta V_2 = Sdx$, а в области III уменьшается на $\Delta V_3 = Sdx$. Этот процесс по энергетическим расчётам является незначительным, поэтому поле в пограничной области I–II остаётся практически неизменным. Таким образом, при заданном смещении:

$$dW_M(\Delta z) \approx \frac{B_2^2}{2\mu_0} Sdx - \frac{B_0^2}{2\mu_0} Sdx = (\mu - 1) \frac{B_0^2}{2\mu_0} Sdx.$$

Следовательно, искомая сила равна:

$$F_M = \left(\frac{\partial W_M}{\partial z} \right) \approx \frac{B_0^2}{2\mu_0} S. \quad (3)$$

1 Экспериментальная установка

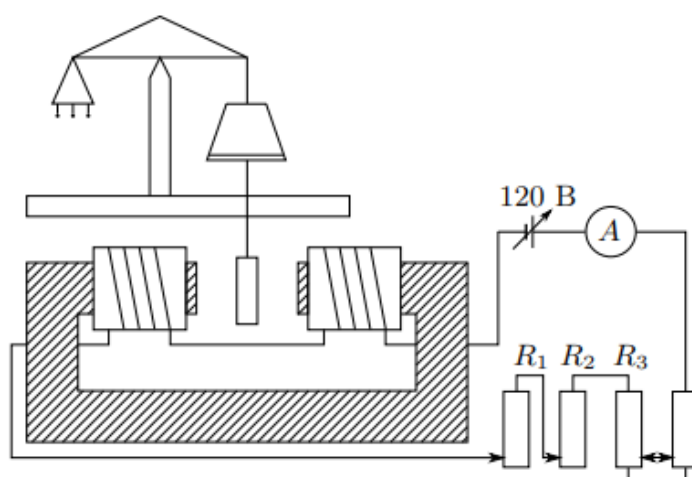


Рис. 3: Схема экспериментальной установки.

Схема установки изображена на рис. 3. Магнитное поле с максимальной индукцией ≈ 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 постоянного напряжения.

Градуировка электромагнита (связь между индукцией магнитного поля B в зазоре электромагнита и силой тока I в его обмотках) производится при помощи милливеберметра. Альтернативно магнитное поле электромагнита можно измерить с помощью датчика Холла. 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 $\delta P = F$ — 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.

2 Выполнение

1. Ток изменяется в диапазоне от нуля до $I_{\max} = 1.17$ А.
2. Прокалибруем электромагнит. Измеряем зависимость B от силы тока I .
3. Построим график зависимости $B(I)$ с учетом погрешностей
4. Измеряем силы действующие на образцы в магнитном поле. Для этого, не включая электромагнит, подвесьте к весам один из образцов, обнулите их показания. Проведем измерения $\Delta P(I)$ для всех токов

$$\Delta P = 0.5 \text{ мГ}$$

5. Построим графики зависимости $|\Delta P| = f(B^2)$

B , мТл	I , А	ΔB , мТл	ΔI , А
228.9	0.2	11.445	0.009
363.7	0.35	18.185	0.012
514.9	0.5	25.745	0.015
646.9	0.65	32.345	0.018
748.9	0.75	37.445	0.02
867.9	0.90	43.395	0.023
960.1	1.05	48.005	0.026
1031.3	1.17	51.565	0.0284

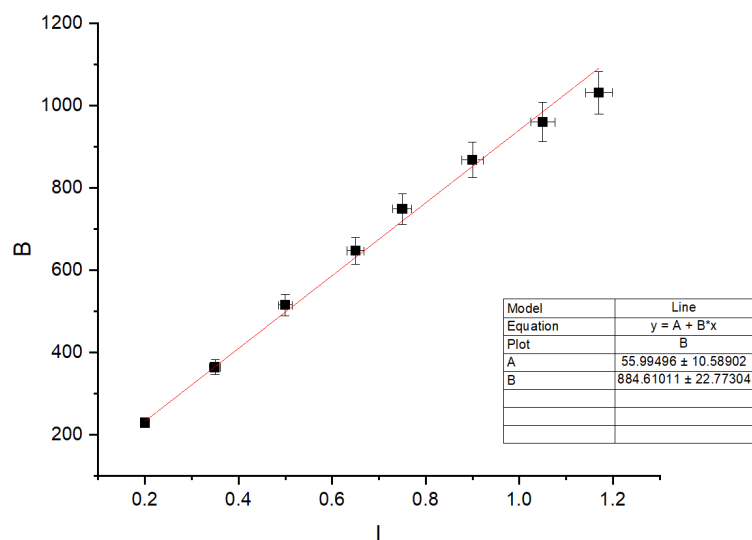


Рис. 4: Калибровка $B(I)$

I , А	B , мТл	B^2 , мТл ²	ΔB^2	P , мГ
0.2	228.9	52395	130	42
0.35	363.7	132277	330	86
0.5	514.9	265122	662	132
0.65	646.9	418479	1046	177
0.75	748.9	560851	1402	200
0.90	867.9	753250	1883	235
1.05	960.1	921792	2304	268
1.17	1031.3	1063579	2658	281

Таблица 1: Графит

6. По наклонам полученных прямых рассчитайте магнитную восприимчивость.

$$\chi = \frac{2\mu_0 kg}{\pi d^2/4}$$

$$\chi_{\text{вольфрам}} = (5,81 \pm 0,05) \cdot 10^{-5}, \quad \chi_{Cu} = (-7.7 \pm 0.2) \cdot 10^{-6} \quad (1)$$

$$\chi_{\text{графит}} = (5 \pm 1) \cdot 10^{-5}, \quad \chi_{Al} = (1.64 \pm 0.02) \cdot 10^{-5} \quad (2)$$

I, A	$B, \text{ мТл}$	$B^2, \text{ мТл}^2$	ΔB^2	$P, \text{ мГ}$
0.2	228.9	52395	130	9
0.35	363.7	132277	330	30
0.5	514.9	265122	662	58
0.65	646.9	418479	1046	98
0.75	748.9	560851	1402	128
0.90	867.9	753250	1883	171
1.05	960.1	921792	2304	216
1.17	1031.3	1063579	2658	245

Таблица 2: Вольфрам

I, A	$B, \text{ мТл}$	$B^2, \text{ мТл}^2$	ΔB^2	$P, \text{ мГ}$
0.2	228.9	52395	130	-1
0.35	363.7	132277	330	-5
0.5	514.9	265122	662.805025	-8
0.65	646.9	418479	1046	-15
0.75	748.9	560851	1402	-18
0.90	867.9	753250	1883	-24
1.05	960.1	921792	2304	-29
1.17	1031.3	1063579	2658	-33

Таблица 3: Медь

I, A	$B, \text{ мТл}$	$B^2, \text{ мТл}^2$	ΔB^2	$P, \text{ мГ}$
0.2	228.9	52395	130	3
0.35	363.7	132277	330	8
0.5	514.9	265122	662	16
0.65	646.9	418479	1046	26
0.75	748.9	560851	1402	36
0.90	867.9	753250	1883	48
1.05	960.1	921792	2304	61
1.17	1031.3	1063579	2658	69

Таблица 4: Алюминий

3 Вывод

В ходе данной работы была измерена магнитная восприимчивость диа- и пара- магнетиков. Были исследованы образцы алюминия, меди и графита. Для алюминия и меди и вольфрама табличные значения магнитной восприимчивости равны $\chi_{Al}^t = 2,3 \cdot 10^{-5}$ и $\chi_{Cu}^t = -1,0 \cdot 10^{-5}$ соответственно. Полученные экспериментально данные близки к табличным. Исходя из этого можно сказать, что алюминий является парамагнетиком ($\chi > 0$), а медь в свою очередь – диамагнетиком ($\chi < 0$).

Результаты эксперимента для графита. Несмотря на то, что графит должен демонстрировать диамагнетизм, в опыте он обладает парамагнитными свойствами. Это могло произойти из-за того, что в нем присутствуют примеси.

