

Лабораторная работа №3.4.1
Измерение магнитной восприимчивости диа- и
парамагнетиков

Струков О. И.
Б04-404

Введение

Цель работы: измерение магнитной восприимчивости диа- и парамагнетиков.

В работе используются: электромагнит, весы, милливеберметр, регулируемый источник постоянного тока, образцы диа- и парамагнетиков.

Теоретические сведения

Магнитная восприимчивость тел может быть определена методом измерения сил, которые действуют на тела в магнитном поле. Пусть площадь образца равна S , его магнитная проницаемость – μ , а поле в зазоре равно B .

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

$$F = \left(\frac{\Delta W_m}{\Delta l} \right)_I, \quad (1)$$

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

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

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

$$\Delta W_m = \frac{1}{2\mu_0} \frac{B^2}{\mu} S \Delta l - \frac{1}{2\mu_0} B^2 S \Delta l = -\frac{\chi}{2\mu_0 \mu} B^2 S \Delta l. \quad (3)$$

Следовательно, на образец действует сила

$$F = -\frac{\chi}{2\mu_0 \mu} B^2 S. \quad (4)$$

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

$$F = -\frac{\chi B^2 S}{2\mu_0}. \quad (5)$$

Зная коэффициент наклона k прямой зависимости $F(B^2)$, можно найти магнитную восприимчивость образца:

$$\chi = \frac{-2\mu_0 k}{S} \quad (6)$$

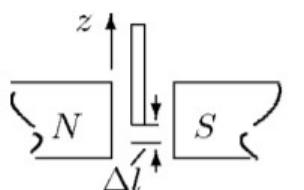


Рис. 1: Расположение образца в зазоре электромагнита

Экспериментальная установка

Магнитное поле с максимальной индукцией $\simeq 1$ Тл создаётся в зазоре электромагнита, работающего от источника постоянного тока. Диаметр полюсов существенно превосходит ширину зазора, поэтому поле в средней части зазора достаточно однородно. Величина тока, проходящего через обмотки электромагнита, задаётся регулируемым источником питания и измеряется амперметром, 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 $\Delta P = F - F_0$ – сила, действующая на образец со стороны магнитного поля.

Ход работы

1. Проведена калибровка электромагнита – получена зависимость $\Phi(I)$. Так как $\Phi = BSN$, из неё была получена зависимость $B = f(I)$ и аппроксимирована прямой $B = 0,296 \cdot I$

I, A	$\Phi, мВб$	$B, Тл$
$0,24 \pm 0,01$	$0,5 \pm 0,1$	$0,069 \pm 0,014$
$0,54 \pm 0,01$	$1,2 \pm 0,1$	$0,167 \pm 0,014$
$0,93 \pm 0,01$	$2,1 \pm 0,1$	$0,292 \pm 0,014$
$1,21 \pm 0,01$	$2,7 \pm 0,1$	$0,375 \pm 0,014$
$1,51 \pm 0,01$	$3,3 \pm 0,1$	$0,458 \pm 0,014$
$1,90 \pm 0,01$	$4,2 \pm 0,1$	$0,583 \pm 0,014$
$2,20 \pm 0,01$	$4,8 \pm 0,1$	$0,667 \pm 0,014$
$2,50 \pm 0,01$	$5,4 \pm 0,1$	$0,750 \pm 0,014$
$2,80 \pm 0,01$	$5,8 \pm 0,1$	$0,806 \pm 0,014$
$3,02 \pm 0,01$	$6,2 \pm 0,1$	$0,861 \pm 0,014$

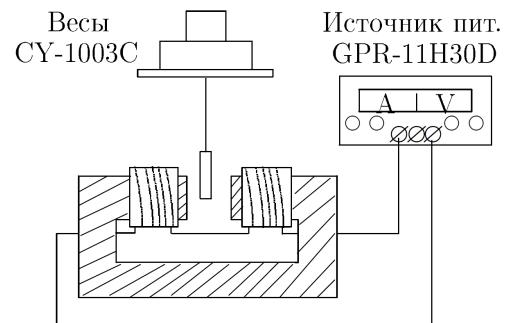
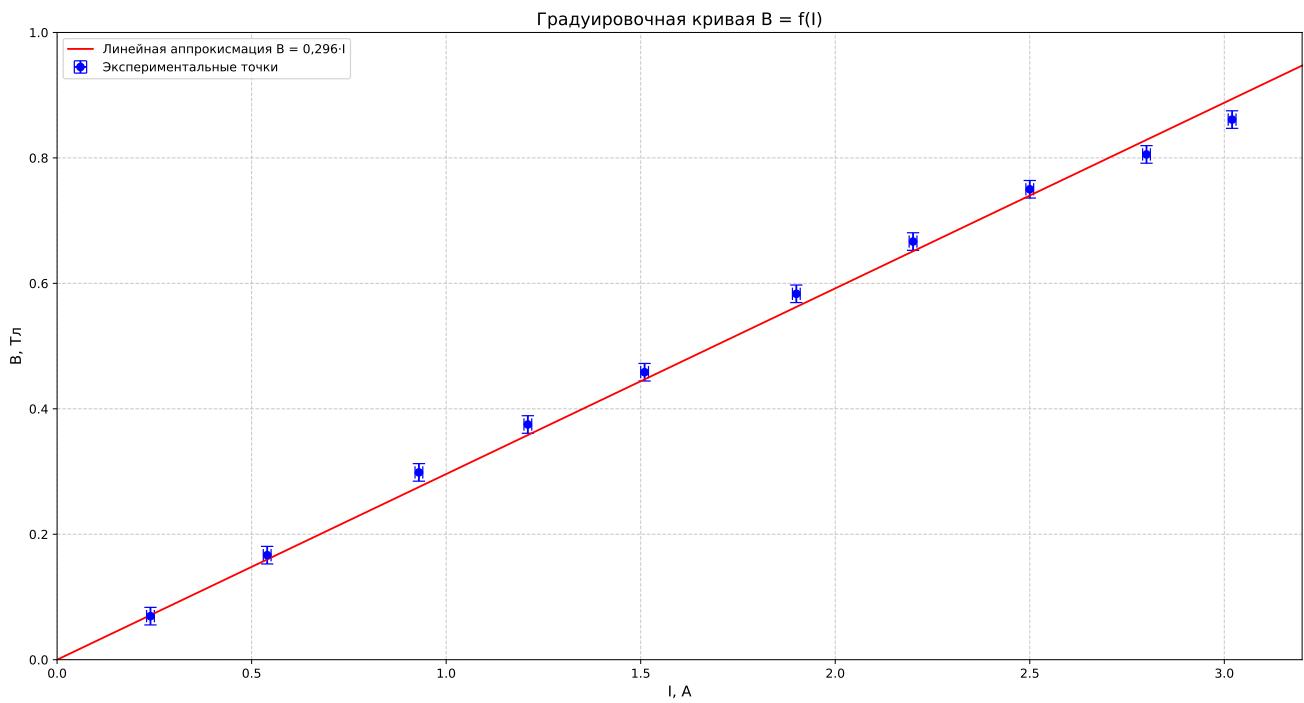


Рис. 2: Схема экспериментальной установки.



2. К весам над электромагнитом по очереди подвешивались образцы из графита, вольфрама, меди и алюминия. Затем проводились измерения перегрузок при понижении силы тока в электромагните от максимальной (3 А) до нуля. После этого были получены и изображены на графике зависимости $|\Delta P| = f(B^2)$.

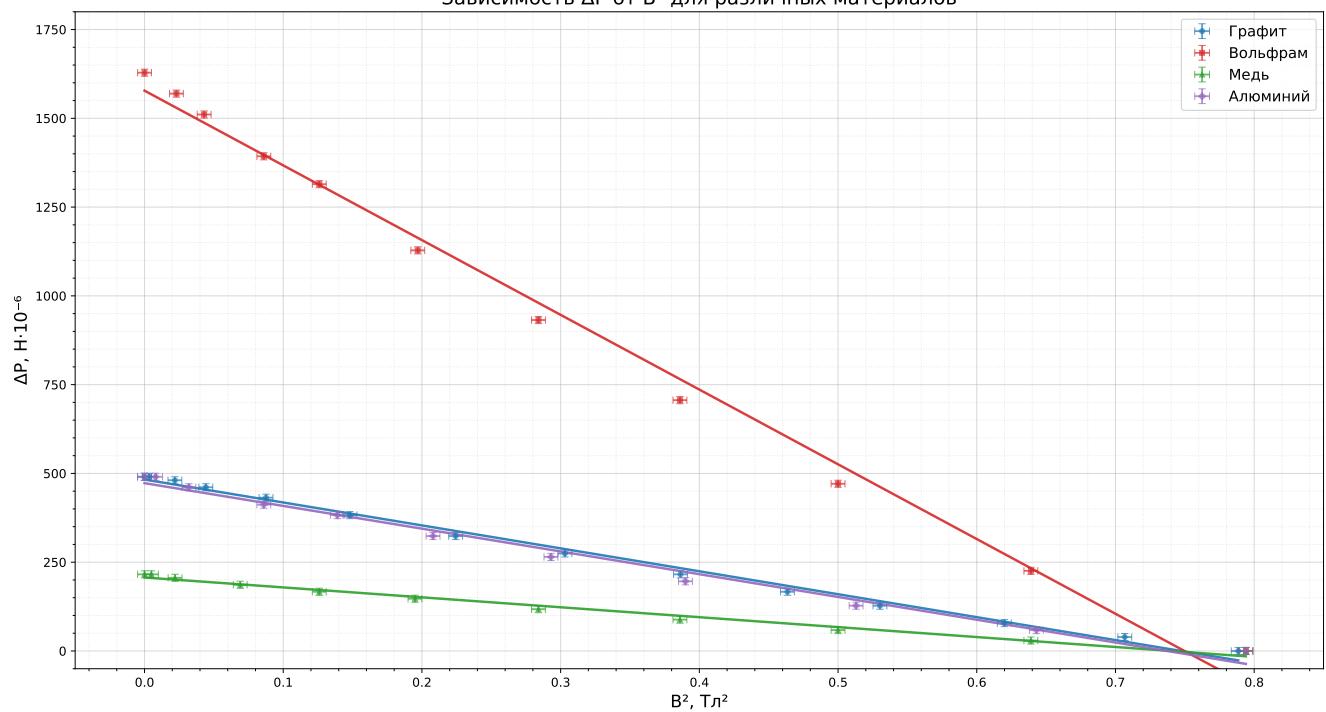
Графит			
I, A	m, mg	B^2, Tl^2	$ \Delta P , H \cdot 10^{-6}$
$3,00 \pm 0,01$	0 ± 1	$0,789 \pm 0,002$	0 ± 10
$2,84 \pm 0,01$	4 ± 1	$0,707 \pm 0,002$	39 ± 10
$2,66 \pm 0,01$	8 ± 1	$0,620 \pm 0,002$	78 ± 10
$2,46 \pm 0,01$	13 ± 1	$0,530 \pm 0,002$	127 ± 10
$2,30 \pm 0,01$	17 ± 1	$0,464 \pm 0,002$	166 ± 10
$2,10 \pm 0,01$	22 ± 1	$0,386 \pm 0,002$	215 ± 10
$1,86 \pm 0,01$	28 ± 1	$0,303 \pm 0,002$	274 ± 10
$1,60 \pm 0,01$	33 ± 1	$0,224 \pm 0,002$	323 ± 10
$1,30 \pm 0,01$	39 ± 1	$0,148 \pm 0,002$	382 ± 10
$1,00 \pm 0,01$	44 ± 1	$0,088 \pm 0,002$	431 ± 10
$0,71 \pm 0,01$	47 ± 1	$0,044 \pm 0,002$	461 ± 10
$0,50 \pm 0,01$	49 ± 1	$0,022 \pm 0,002$	480 ± 10
$0,20 \pm 0,01$	50 ± 1	$0,004 \pm 0,002$	490 ± 10
$0,00 \pm 0,01$	50 ± 1	$0,000 \pm 0,002$	490 ± 10

Вольфрам			
I, A	m, мг	B^2 , Тл ²	$ \Delta P $, H · 10 ⁻⁶
3,01 ± 0,01	0 ± 1	0,794 ± 0,002	0 ± 10
2,70 ± 0,01	-23 ± 1	0,639 ± 0,002	225 ± 10
2,39 ± 0,01	-48 ± 1	0,500 ± 0,002	470 ± 10
2,10 ± 0,01	-72 ± 1	0,386 ± 0,002	706 ± 10
1,80 ± 0,01	-95 ± 1	0,284 ± 0,002	931 ± 10
1,50 ± 0,01	-115 ± 1	0,197 ± 0,002	1128 ± 10
1,20 ± 0,01	-134 ± 1	0,126 ± 0,002	1314 ± 10
0,99 ± 0,01	-142 ± 1	0,086 ± 0,002	1393 ± 10
0,70 ± 0,01	-154 ± 1	0,043 ± 0,002	1510 ± 10
0,51 ± 0,01	-160 ± 1	0,023 ± 0,002	1569 ± 10
0,00 ± 0,01	-166 ± 1	0,000 ± 0,002	1628 ± 10

Медь			
I, A	m, мг	B^2 , Тл ²	$ \Delta P $, H · 10 ⁻⁶
3,01 ± 0,01	0 ± 1	0,794 ± 0,002	0 ± 10
2,70 ± 0,01	3 ± 1	0,639 ± 0,002	29 ± 10
2,39 ± 0,01	6 ± 1	0,500 ± 0,002	58 ± 10
2,10 ± 0,01	9 ± 1	0,386 ± 0,002	88 ± 10
1,80 ± 0,01	12 ± 1	0,284 ± 0,002	117 ± 10
1,49 ± 0,01	15 ± 1	0,195 ± 0,002	147 ± 10
1,20 ± 0,01	17 ± 1	0,126 ± 0,002	166 ± 10
0,89 ± 0,01	19 ± 1	0,069 ± 0,002	186 ± 10
0,50 ± 0,01	21 ± 1	0,022 ± 0,002	206 ± 10
0,25 ± 0,01	22 ± 1	0,005 ± 0,002	215 ± 10
0,00 ± 0,01	22 ± 1	0,000 ± 0,002	215 ± 10

Алюминий			
I, A	m, мг	B^2 , Тл ²	$ \Delta P $, H · 10 ⁻⁶
3,01 ± 0,01	0 ± 1	0,794 ± 0,002	0 ± 10
2,71 ± 0,01	-6 ± 1	0,643 ± 0,002	58 ± 10
2,42 ± 0,01	-13 ± 1	0,513 ± 0,002	127 ± 10
2,11 ± 0,01	-20 ± 1	0,390 ± 0,002	196 ± 10
1,83 ± 0,01	-27 ± 1	0,293 ± 0,002	264 ± 10
1,54 ± 0,01	-33 ± 1	0,208 ± 0,002	323 ± 10
1,26 ± 0,01	-39 ± 1	0,139 ± 0,002	382 ± 10
0,99 ± 0,01	-42 ± 1	0,086 ± 0,002	412 ± 10
0,60 ± 0,01	-47 ± 1	0,032 ± 0,002	461 ± 10
0,30 ± 0,01	-50 ± 1	0,008 ± 0,002	490 ± 10
0,00 ± 0,01	-50 ± 1	0,000 ± 0,002	490 ± 10

Зависимость ΔP от B^2 для различных материалов



3. Из полученных зависимостей найдены коэффициенты наклона прямых:

Материал	$k, \text{Н} \cdot 10^{-5} / \text{Tл}^2$
Графит	$-622,0 \pm 18,5$
Вольфрам	$-2054,3 \pm 65,2$
Медь	$-272,1 \pm 9,8$
Алюминий	$-618,2 \pm 18,7$

4. Из угловых коэффициентов с помощью формулы (6) была определена магнитная восприимчивость каждого материала:

Материал	Диаметр, м	χ
Графит	0,0067	$(4,43 \pm 0,13) \cdot 10^{-5}$
Вольфрам	0,0100	$(10,30 \pm 0,33) \cdot 10^{-5}$
Медь	0,0100	$(1,36 \pm 0,05) \cdot 10^{-5}$
Алюминий	0,0100	$(3,09 \pm 0,09) \cdot 10^{-5}$

Вывод

Ниже приведены табличные значения магнитной восприимчивости каждого из исследуемых материалов:

Материал	Магнитная восприимчивость χ	Тип магнетизма
Графит	$-1,6 \times 10^{-5}$	Диамагнетик
Вольфрам	$+6,8 \times 10^{-5}$	Парамагнетик
Медь	$-1,0 \times 10^{-5}$	Диамагнетик
Алюминий	$+2,2 \times 10^{-5}$	Парамагнетик

Поскольку в вычислениях использовались абсолютные значения силы, действующей на образец, все значение получились положительными. Однако, если учитывать знак, то восприимчивость графита и меди будет отрицательной, что согласуется с данными выше. В рамках погрешности ни одно из значений не сошлось с табличным, тем не менее результаты оказались близки к действительности. На неточность вероятнее всего наибольшее влияние оказали возможное наличие примесей в образцах и систематические погрешности измерений.