

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа физики и исследований им. Ландау

# Лабораторная работа

## Диа- и парамагнетика

Выполнила:  
Карасёва Таисия  
Б02-001

Долгопрудный 2021

**Цель работы:** измерение магнитной восприимчивости диа- и парамагнетиков.

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

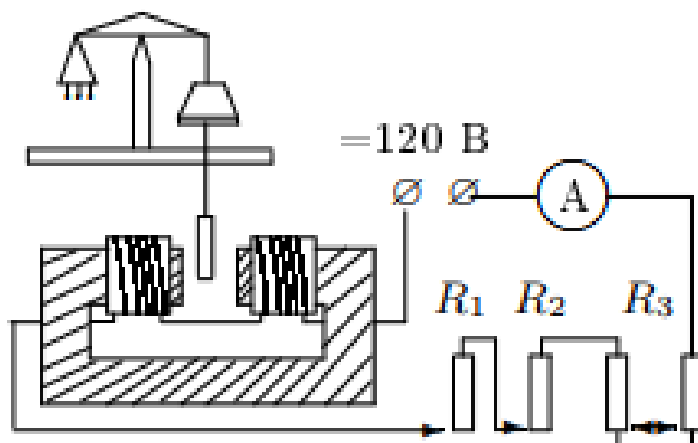


Рис. 1: Экспериментальная установка.

Магнитное поле с максимальной индукцией  $\approx 1$  Тл создаётся в зазоре электромагнита, питаемого постоянным током. Диаметр полюсов  $\gg$  ширина зазора  $\Rightarrow$  поле в средней части зазора можно считать однородным. Величина тока, проходящего через обмотки электромагнита, задаётся регулируемым источником постоянного напряжения. Градуировка электромагнита (связь между индукцией  $B$  в зазоре и силой тока  $I$  в обмотках) производится при помощи милливебметра.

Образцы поочерёдно подвешиваются к аналитическим весам так, что один конец образца - в зазоре, другой - вне (где можно пренебречь индукцией магнитного поля). При помощи весов измеряется перегрузка  $\Delta P = F$  - сила, действующая на образец со стороны магнитного поля.

Таблица 1: Погрешности.

Инструмент	погрешность
Амперметр	0.05 А
Милливебметр	0.05 мВ
Весы	1 мг

Диаметры образцов = 1 см

## Теория

Магнитная восприимчивость тел может быть определена по измерению сил, действующих на тела в магнитном поле. В работе, один конец тонкого длинного стержня помещается в зазоре электромагнита (область однородного поля), а другой - вне его (где магнитным полем можно пренебречь).

$\mu$  - магнитная проницаемость образца,  $s$  - его площадь сечения,  $B_0$  - поле в зазоре,  $x$  - глубина погружения образца,  $I$  - постоянный ток в обмотке электромагнита. Сила со стороны магнитного поля, необходимая для удержания образца в магнитном поле

$$F_M = \left( \frac{\partial W_M}{\partial x} \right)_I \quad (1)$$

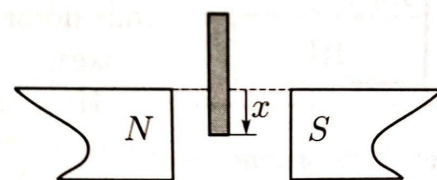


Рис. 2: Образец в зазоре электромагнита.

где  $W_M$  - магнитная энергия системы при  $I = const$  (т.е. при  $B_0 = const$ ) в зависимости от смещения образца  $x$ .

С учётом выражения для объёмной плотности магнитной энергии

$$\omega_M = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} \quad (2)$$

магнитная энергия может быть рассчитана по формуле

$$W_M = \frac{1}{2\mu_0} \int_V \frac{B^2}{\mu} dV \quad (3)$$

Систему можно условно разбить на 3 части (Рис. 3).

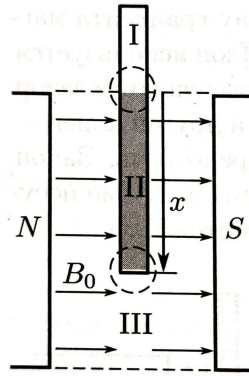


Рис. 3: К вычислению  $F_M$ .

Таблица 2: К вычислению  $F_M$ .

Номер	область	магнитное поле
I	вне электромагнита	$B_1 \approx 0$
II	погруженная в электромагнит	$B_2 \approx \mu B_0$
III	вдали от стержня	$B_3 \approx B_0$

При смещении стержня вглубь электромагнита на некоторое расстояние  $dx$  объём области II увеличивается на  $dV_2 = Sdx$ , а области III - уменьшается на  $dV_3 = -Sdx$ . В пограничных участках II-III и I-II распределение поля не меняется. Изменение области I не учитываем, т.к. в ней нет поля

Изменение магнитной энергии при смещении образца на  $dx$

$$dW_m(dx) = \frac{B_2^2}{2\mu\mu_0} Sdx - \frac{B_3^2}{2\mu_0} Sdx = (\mu - 1) \frac{B_0^2}{2\mu_0} Sdx \quad (4)$$

$\Downarrow$

$$F_M = \left( \frac{\partial W_M}{\partial x} \right)_{B_0} \approx \chi \frac{B_0^2}{2\mu_0} S \quad (5)$$

где  $\chi = \mu - 1$  - восприимчивость. Для парамагнетиков  $\chi > 0 \Rightarrow$  они втягиваются в зазор, для диамагнетиков  $\chi < 0 \Rightarrow$  они выталкиваются из зазора

## Ход работы

1. Проверим работу цепи. Оценим диапазон изменения тока через обмотки  $I_{max} \approx 3 \text{ A}$
2. Прокалибруем электромагнит. С помощью милливексметра снимем зависимость магнитного потока  $\Phi = BSN$ , пронизывающего пробную катушку, находящуюся в зазоре, от тока  $I$ .  $SN = 72 \text{ см}^2$

Таблица 3: Калибровка электромагнита.

$I, \text{ A}$	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3.0
$\Phi, \text{ мВ}$	0.7	1.5	2.2	2.9	3.5	4.2	4.9	5.6	6.0	6.5

Погрешность индукции магнитного поля  $\sigma_B = \frac{\sigma_\Phi}{NS} \approx 10^{-4} \text{ Тл}$ .

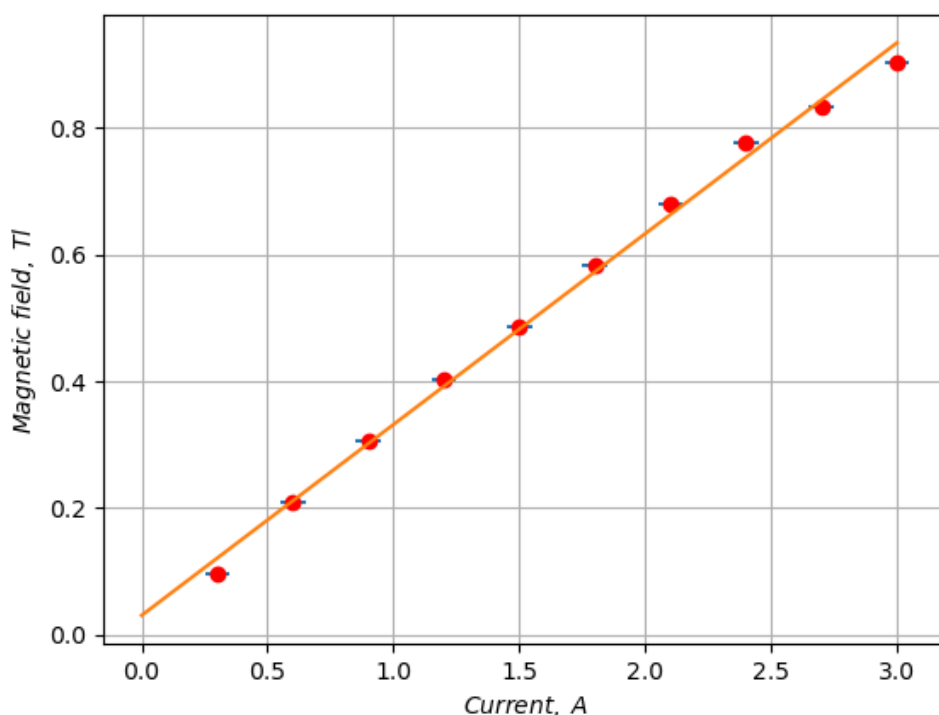


Рис. 4: Калибровка электромагнита.

Аппроксимирующая прямая построена с помощью метода наименьших квадратов. Угловой коэффициент  $= 0.30 \pm 0.02$

3. При нулевом токе через электромагнит подвесим к весам один из образцов так, чтобы он не касался наконечников электромагнита. Обнулим показания весов, чтобы измерять непосредственно перегрузки  $\Delta P = F$

Таблица 4: Зависимость перегрузок от силы тока для алюминиевого образца.

$I, \text{ A}$	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3.0
$\Delta P, \text{ г}$	0.001	0.002	0.006	0.009	0.014	0.020	0.027	0.033	0.040	0.047

Таблица 5: Зависимость перегрузок от силы тока для медного образца.

$I, A$	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3.0
$\Delta P, \text{г}$	-0.001	-0.003	-0.003	-0.005	-0.006	-0.009	-0.011	-0.014	-0.017	-0.020

4. Построим графики  $|\Delta P|(B^2)$

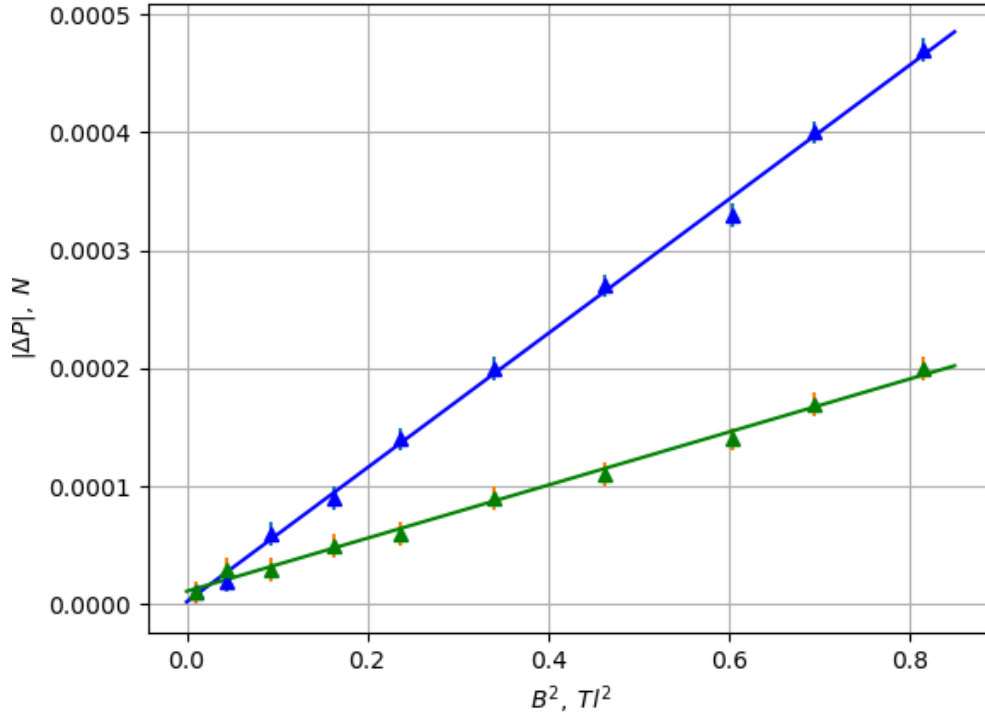


Рис. 5: Определению магнитной восприимчивости.

С помощью МНК найдём угловые коэффициенты для данных зависимостей

$$k_{Al} = 0.00057 \pm 0.00004$$

$$k_{Cu} = 0.00022 \pm 0.00002$$

Тогда искомые магнитные восприимчивости

$$\chi_{Al} = \frac{2\mu_0 k_{Al}}{s}; \quad \chi_{Cu} = -\frac{2\mu_0 k_{Cu}}{s}$$

$$\sigma_{\chi_{Al}} = \sigma_{k_{Al}} \frac{2\mu_0}{s}; \quad \sigma_{\chi_{Cu}} = \sigma_{k_{Cu}} \frac{2\mu_0}{s}$$

Итого

$$\chi_{Al} = 18.4 \pm 1.2 \cdot 10^{-6}; \quad \chi_{Cu} = -7.7 \pm 0.6$$

## Вывод

В ходе работы с помощью построения градуировочной кривой между индукцией магнитного поля и тока в электромагните и измерений перегрузок, действующих на диа- и парамагнетики в магнитном поле

- (a) была подтверждена различность знаков магнитной восприимчивости диа- и парамагнетиков
- (b) были определены магнитные восприимчивости образцов алюминия и меди:  $\chi_{Al} = 18.4 \pm 1.2 \cdot 10^{-6}$ ;  $\chi_{Cu} = -7.7 \pm 0.6$ . Относительная погрешность составила 7% и 8% соответственно. Полученные значения отличаются от табличных на  $\approx 20\%$ , что может быть объяснено непорядочностью сплава образцов.