

# Лабораторная работа 3.4.1: Диа- и пара-магнетики

Сидорчук Максим Б01-304

21 декабря 2024 г.

## Краткие теоретические сведения

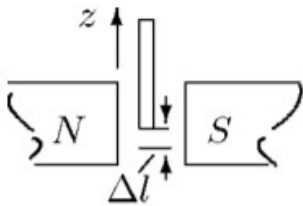
Измерение магнитной восприимчивости материалов будем проводить с помощью расчета силы, действующей на магнетик в магнитном поле. При смещении образца на расстояние  $\Delta l$  внутрь магнитного поля магнитная сила, действующая на него, равна

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

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

Магнитная энергия рассчитывается по формуле:

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



При смещении образца магнитная энергия меняется только в области зазора (в объёме площади  $S$  и высоты  $\Delta l$ ), а около верхнего конца стержня остаётся неизменной, поскольку магнитного поля там практически нет. Тогда изменение магнитной энергии будет:

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

Следовательно, на образец действует сила

$$F = (\mu - 1) \frac{B^2}{2\mu_0} S = \chi \frac{B^2}{2\mu_0} S$$

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

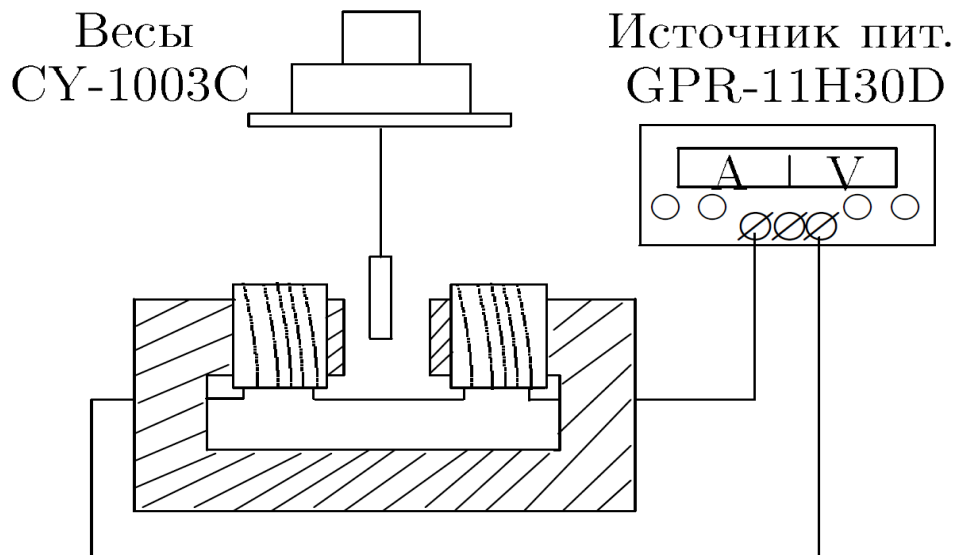


Рис. 1: Схема экспериментальной установки.

## Экспериментальная установка

Магнитное поле создаётся в зазоре электромагнита, питаемого постоянным током. Диаметр полюсов существенно превосходит ширину зазора, поэтому поле в средней части зазора однородно. Величина тока, проходящего через обмотки электромагнита, задаётся регулируемым источником питания GPR 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 либо тесламетра. Сила, действующая на образец со стороны магнитного поля измеряется в помощью весов: смотрится разность веса образца вне поля и в поле.

## Ход работы

### Градуировка электромагнита

Сначала проведём градуировку магнита: с помощью тесламетра измеряем магнитное поле при разных токах:

$I$ , А	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.17
$B$ , мТл	110.6	210.3	303.1	399.2	490.4	592.4	682.5	785.3	918	1047.7	1130.4	1147.7

Таблица 1: Результаты измерений

По полученным данным построим график зависимости  $B(I)$ .

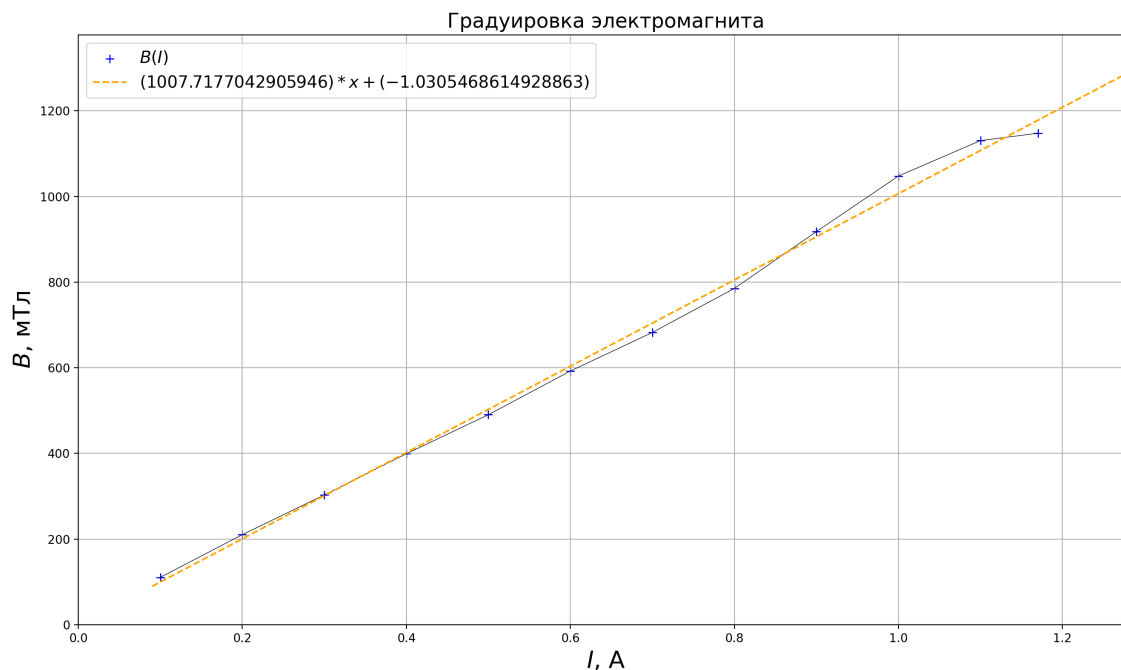


Рис. 2: Градуировка электромагнита  $B(I)$

## Измерение сил, действующих на образцы в магнитном поле

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  $\Delta P = F$  – силы, действующей на образец при различных токах в обмотках электромагнита. Были получены следующие значения:

$m_{Al} = 25,228$  г,  $m_{Cu} = 83,270$  г,  $d = 1 \pm 0,01$  см (диаметр образцов).

$I$ , А	0,22	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,05	1,15
Al, $\Delta m$ , мг	4	7	15	24	36	49	62	70
Cu, $\Delta m$ , мг	-3	-4	-7	-12	-17	-23	-29	-32

Таблица 2: Изменение веса образцов в магнитном поле

## Расчёт магнитной восприимчивости

Построим графики зависимости  $\Delta P(B^2)$  для меди и алюминия. Если  $k$  – угловой коэффициент наклона графика, то

$$k = \frac{\chi S}{2\mu_0} \rightarrow \chi = \frac{2\mu_0 k}{S}$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения исследуемых образцов. В нашем случае  $S = (0,785 \pm 0,016)$  см<sup>2</sup> для всех образцов. Для меди значения для графика были взяты по модулю чисто для расчета, сам коэффициент будет отрицательным. Полученные значения представлены в таблице.

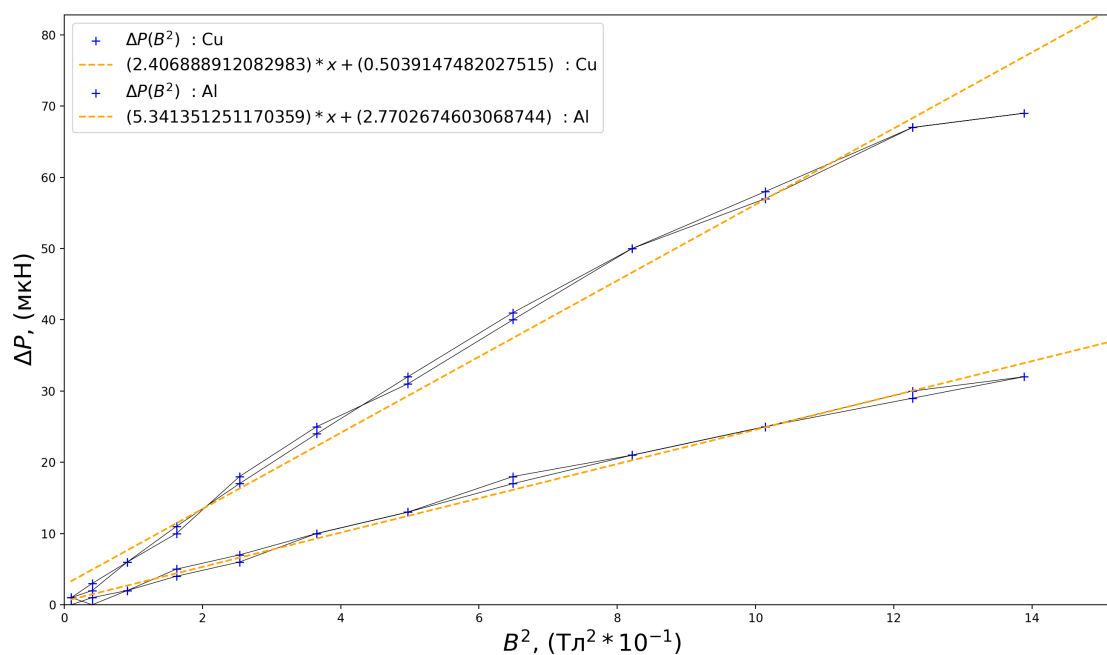


Рис. 3: Зависимость  $\Delta P(B^2)$  для меди и алюминия

Материал	$k$	$\chi$	$\varepsilon_\chi$
Алюминий Al	$5,34 \pm 0,022$	$(1,71 \pm 0,79) \cdot 10^{-5}$	4,9%
Медь Cu	$2,41 \pm 0,009$	$-(7,7 \pm 0,33) \cdot 10^{-6}$	4,7%

## Выводы

В ходе данной работы была измерена магнитная восприимчивость образцов меди и алюминия. Для алюминия и меди табличные значения удельной магнитной восприимчивости равны  $\chi_{Al,уд} = 0,61 \cdot 10^{-9} \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$  и  $\chi_{Cu,уд} = -0,086 \cdot 10^{-9} \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$  соответственно, получается  $\chi_{Al} = 1,64 \cdot 10^{-5}$  и  $\chi_{Cu} = -7,7 \cdot 10^{-6}$ , что достаточно близко к полученным значениям.