

### 3.4.1 – Диа- и парамагнетики.

**Цель работы.** Измерение магнитной восприимчивости диа- и парамагнетного образцов. В работе используются: электромагнит, аналитические весы, милливеберметр, амперметр постоянного тока, реостаты, образцы.

**Теоретическая часть.** Рассмотрим два крупных класса веществ относительно их поведения в магнитном поле. Суммарный магнитный момент электронов в атомах *диамагнетиков* в отсутствие внешнего магнитного поля равен нулю; при внесении вещества в магнитное поле возникают индуцированные атомные токи, создающие магнитный момент, направленный противоположно внешнему полю (проявление принципа Лешателье). Атомы *парамагнетика* же обладают собственными магнитными моментами, которые под действием внешних полей ориентируются по полю и тем самым создают результирующее поле, превышающее внешнее.

Для широкого класса веществ намагниченность (суммарный магнитный момент единицы объема вещества) и напряженность магнитного поля связаны линейно:

$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}, \quad (1)$$

где  $\chi$  – магнитная восприимчивость (скаляр, а не тензор!). Для парамагнетиков  $\chi > 0$ , диамагнетиков –  $\chi < 0$ .

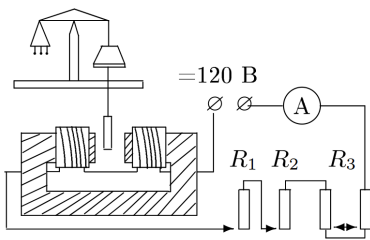


Рис. 2: Схема экспериментальной установки

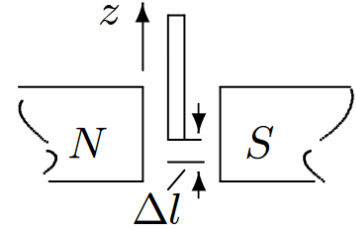


Рис. 1: Образец в электромагните

В данной работе предлагается измерить магнитную восприимчивость различных материалов, используя *метод Гюи*. Тонкий длинный образец вещества вносится в узкий зазор электромагнита, измеряется сила, действующая на него со стороны поля. Найдем связь магнитной восприимчивости и силы. При смещении образца на  $\Delta l$  магнитная сила есть

$$F = \frac{\Delta W}{\Delta l}, \quad (2)$$

где  $\Delta W$  – изменение энергии поля. Магнитная энергия есть

$$W = \frac{1}{2} \int H B dV = \frac{1}{2\mu_0} \int \frac{B^2}{\mu} dV, \quad (3)$$

где интеграл берётся по всему пространству. При смещении образца внутрь зазора поле около верхнего конца поля остаётся практически неизменным. Принимая поле внутри стержня равным измеренному нам полю в зазоре, получим

$$\Delta W = \frac{1}{2\mu_0} \frac{B^2}{\mu} s \Delta l - \frac{1}{2\mu_0} B^2 s \Delta l = -\frac{\chi}{2\mu_0 \mu} B^2 s \Delta l; \quad (4)$$

отсюда следует, что на образец действует сила

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

В нашей работе сила определяется с помощью аналитических весов. Мы исследуем три образца – медь, алюминий, графит.

**Результаты эксперимента.** Построим градуировочную кривую для электромагнита. Калибровку мы проводим милливеберметром, измеряющим магнитный поток  $\Phi = BS_n$ , где  $S_n = 72 \text{ см}^2$ . Отсюда получаем  $B = f(I)$ :

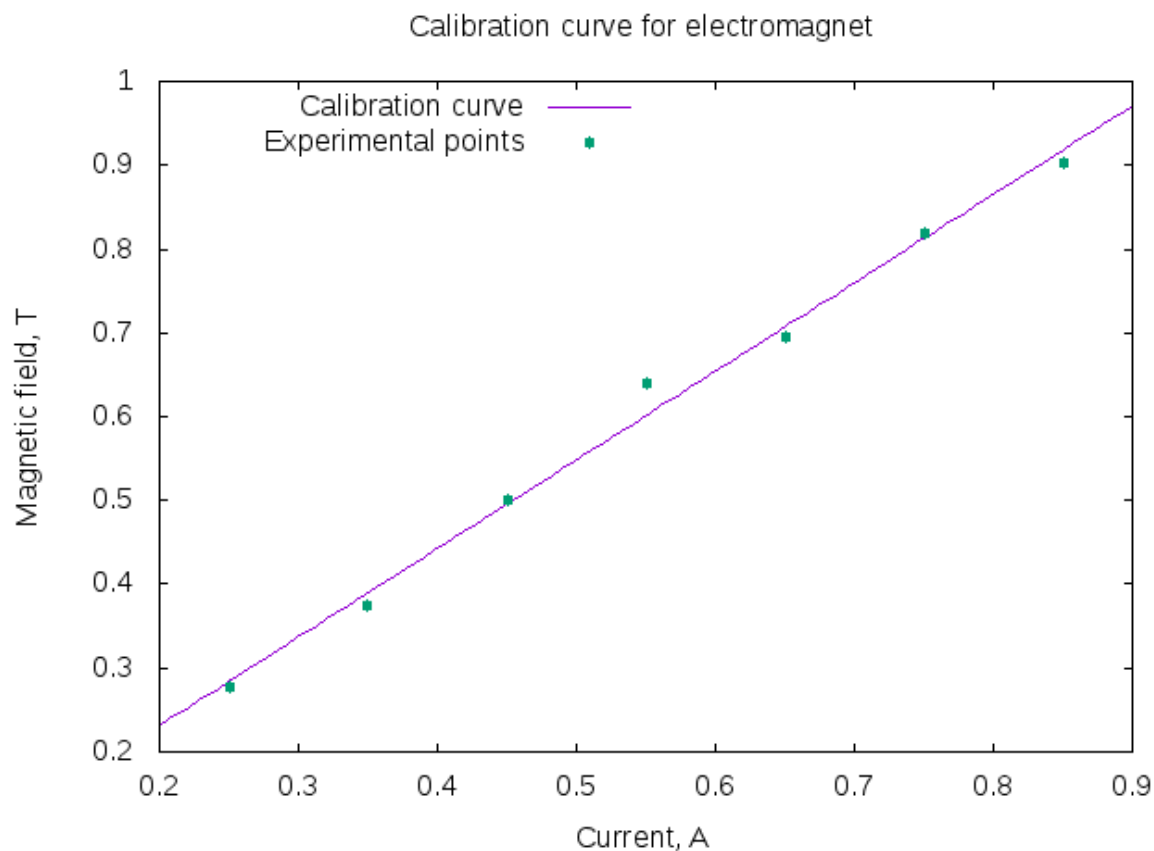


Рис. 3: Калибровочная кривая электромагнита,  $k = 1.05 \pm 0.04 \text{ Тл/А}$ .

Медь		Алюминий		Графит	
$I, \text{ А}$	$m, \text{ мг}$	$I, \text{ А}$	$m, \text{ мг}$	$I, \text{ А}$	$m, \text{ мг}$
1.17	-35	1.17	76	1.17	-187
0.94	-27	0.98	62	0.92	-141
0.77	-20	0.76	42	0.74	-98
0.62	-14	0.59	26	0.54	-54
0.49	-9	0.44	15	0.40	-32
0.31	-4	0.29	6	0.21	-10

Таблица 1: Экспериментальные данные.

Отрицательная масса здесь, конечно, свидетельствует не о существовании антимассы, а о том, что сила направлена противоположно вектору  $\mathbf{g}$ .

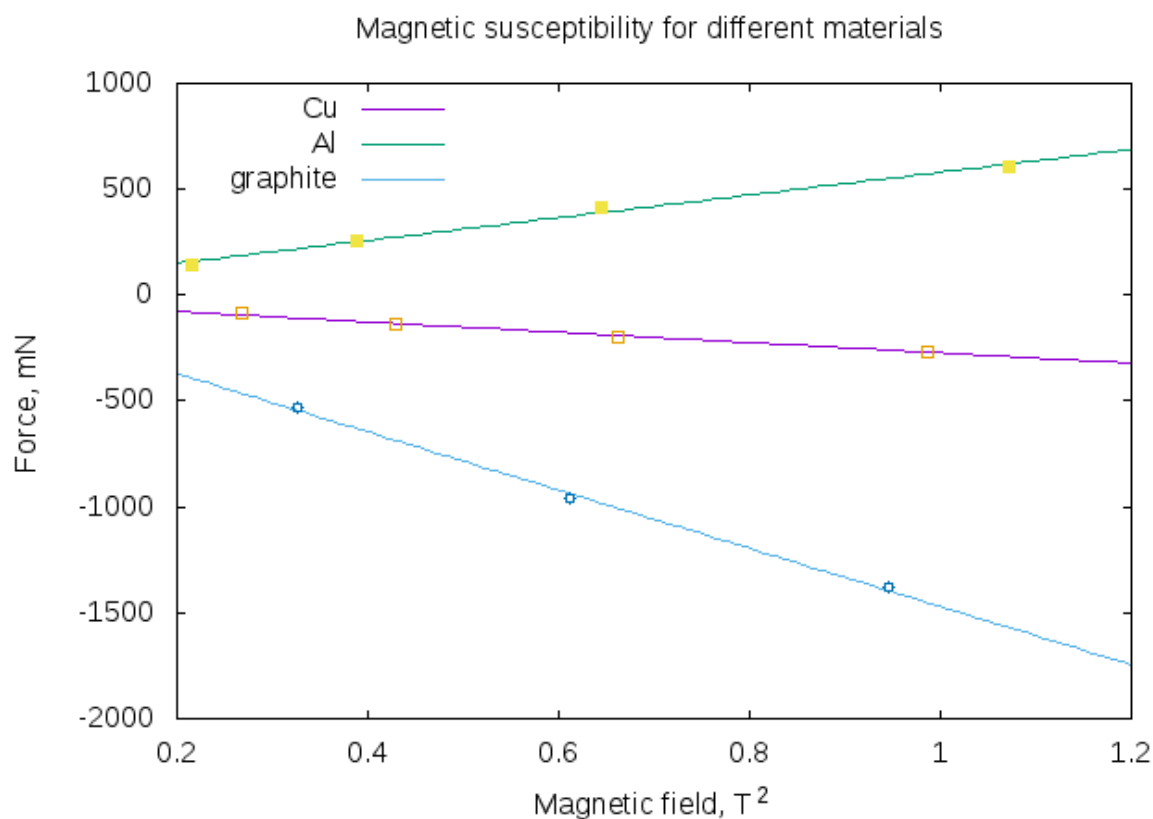


Рис. 4: Магнитная восприимчивость различных веществ.

По полученному наклону прямой мы можем, используя формулу 5, найти магнитную восприимчивость материала. Стержни представляют собой цилиндры диаметрами  $d = 10$  мм для меди,  $d = 10$  мм для алюминия и  $d = 6.7$  мм для графита соответственно. Отсюда получаем:

$$\begin{aligned}\chi_{\text{Cu}} &= (-7.8 \pm 0.5) \times 10^{-9} \text{ м}^3/\text{кг} \\ \chi_{\text{Al}} &= (17 \pm 0.6) \times 10^{-9} \text{ м}^3/\text{кг} \\ \chi_{\text{graphite}} &= (-0.98 \pm 0.5) \times 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}.\end{aligned}$$

Между тем табличные данные есть  $\chi_{\text{Cu}} = -1.13 \times 10^{-9} \text{ м}^3/\text{кг}$ ,  $\chi_{\text{Al}} = 7.54 \times 10^{-9} \text{ м}^3/\text{кг}$ ,  $\chi_{\text{graphite}} = -3.6 \times 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$ .

**Вывод.** Метод Гюи доказал свою применимость на практике и позволил измерить магнитную восприимчивость нескольких материалов в пределах известной погрешности. Кроме того, мы установили, что медь и графит – диамагнетики, а алюминий – парамагнетик.