

# Лабораторная работа 3.4.1

## Исследование диа- и парамагнетиков

Симанкович Александр  
Б01-104

30.09.2022

### Аннотация

В работе изучены свойства диамагнетика (Cu) и парамагнетика (Al). Измерены значения магнитной восприимчивости меди, алюминия, графита и вольфрама.

**Ключевые слова:** диамагнетики, парамагнетики.

### Введение

Применение парамагнетиков и диамагнетиков весьма ограничены. При этом изучение свойств парамагнетиков и диамагнетиков дает экспериментальные результаты для построения теорий квантовой физики, физики кристаллов и других связанных областей, что в свою очередь имеет множество приложений.

Данная работа была проведена в рамках учебного исследовательского курса в Московском физико-техническом институте. Целью работы ставится подтверждение теории, описывающей взаимодействия диа- и парамагнетиков с магнитным полем, а также определение их численных характеристик.

### Теоретическая модель

#### Диамагнетизм

Диамагнитный эффект характерен всем веществам. Данный эффект определяется микроскопическими 'токами', создающимися при помещении вещества в магнитное поле из-за эффекта электромагнитной индукции.

### Методика эксперимента

#### Оборудование и приборы

- электромагнит;
- аналитические весы;
- милливеберметр;
- регулируемый источник постоянного тока;
- образцы меди и алюминия;

В данной работе для определения свойств образцов используется *метод Гюи*. В нем в качестве образца выступает длинный тонкий стержень, один из концов которого помещается в зазор электромагнита (см. рис. 1). В зависимости от знака магнитной восприимчивости  $\chi$  при включении электромагнита стержень будет втягиваться или выталкиваться из зазора.

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

Таким образом, мы получили, что парамагнетики ( $\chi > 0$ ) втягиваются в зазор электромагнита, а диамагнетики ( $\chi < 0$ ) выталкиваются.

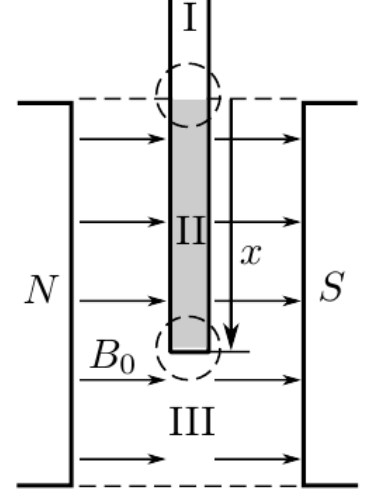


Рис. 1: Схема взаимного расположения образца и магнитного поля.

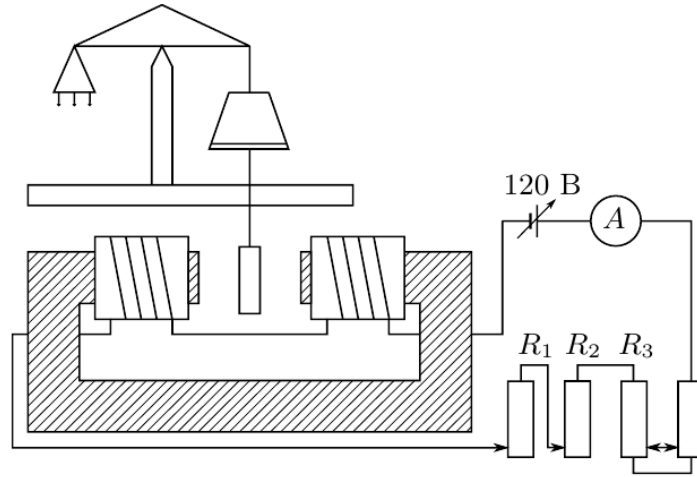


Рис. 2: Схема установки.

Схема установки представлена на рис. 2. В зазоре электромагнита с сердечником, питаемого от источника постоянного тока, создается магнитное поле. Поскольку размер зазора меньше размеров полюсов  $l \ll \sqrt{S}$ , то поле можно считать однородным.

Для определения зависимости  $B(I)$  проводится калибровка электромагнита с помощью веберметра.

Для измерения магнитной восприимчивости будем находить силу, действующую на образец со стороны магнитного поля в электромагните. Для этого воспользуемся аналитическими весами. Изначальная масса образца измеряется при выключенном электромагните. После этого при включенном электромагните мы добиваемся равновесия весов. Перегрузка весов и будет являться требуемой силой  $\Delta P = F$ .

## Результаты

### Калибровка электромагнита

Проведем градуировку электромагнита. Для этого измерим зависимость  $B(I)$ , где  $B$  – модуль вектора индукции магнитного поля в зазоре,  $I_M$  – ток, протекающий через обмотки магнита. Измерения проведем милливеберметром М119 и миллитесламетром АКТАКОМ АТЕ-8702. Погрешности данных приборов:

$$\varepsilon_{ВБ} = (0.015 \cdot \Phi + 0.05) \text{ мВб} \quad \varepsilon_{Тл} = (0.05 \cdot B + 10) \text{ мТл}$$

Точность измерения  $I_M$  определяется точностью амперметра  $A_1$ , встроенного в лабораторный блок питания GPR-11H30D:

$$\varsigma_{A_1} = 0.005 \cdot I + 0.02 \text{ A}$$

Построим графики  $B(I)$  по результатам измерения магнитного поля милливеберметром и миллитесламетром.

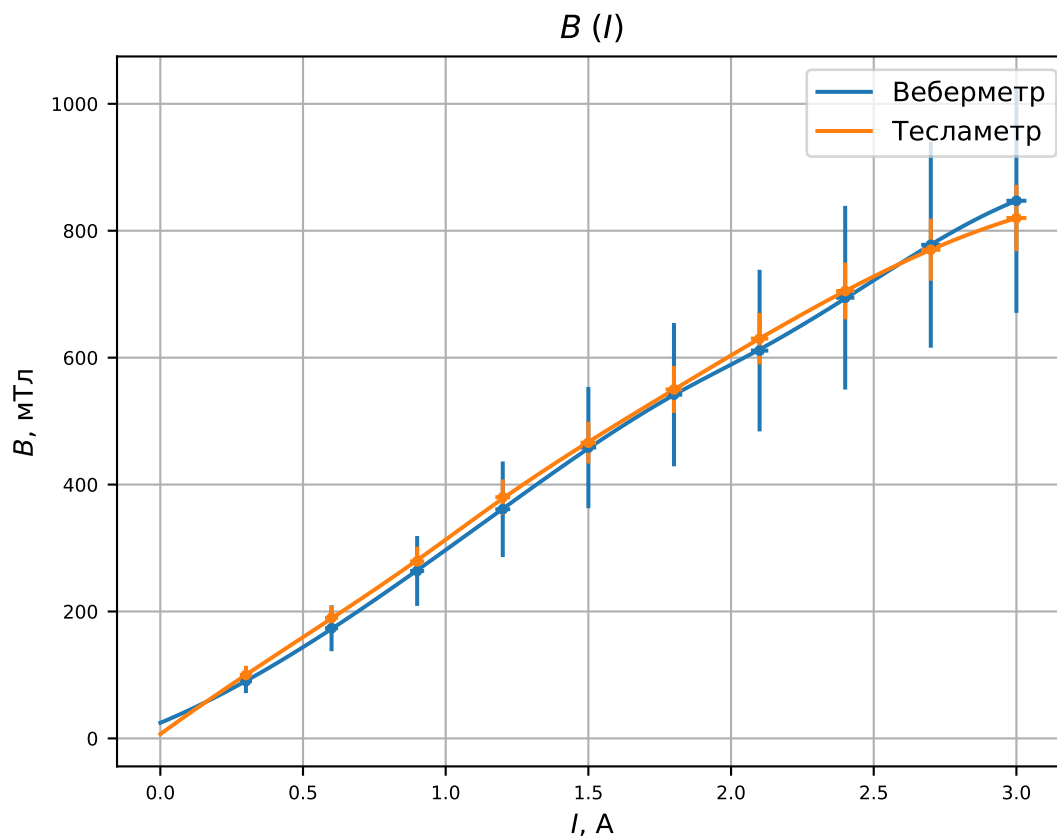


Рис. 3: Зависимость поля в зазоре  $B$  от протекающего тока  $I$

Как видно из графика, калибровка обоими приборами совпадает в пределах погрешности. Для вычисления значения поля в последующих пунктах используется калибровка с помощью тесламетра.

## Измерение перегрузок

С помощью аналитических весов проведем измерения значения перегрузки  $\Delta P$  при различных значениях поля  $B$  в зазоре электромагнита. Измерения будем проводить как в прямом (*рост*), так и в обратном (*падение*) направлении.

Первые измерения проводим для меди и алюминия. Построим графики:

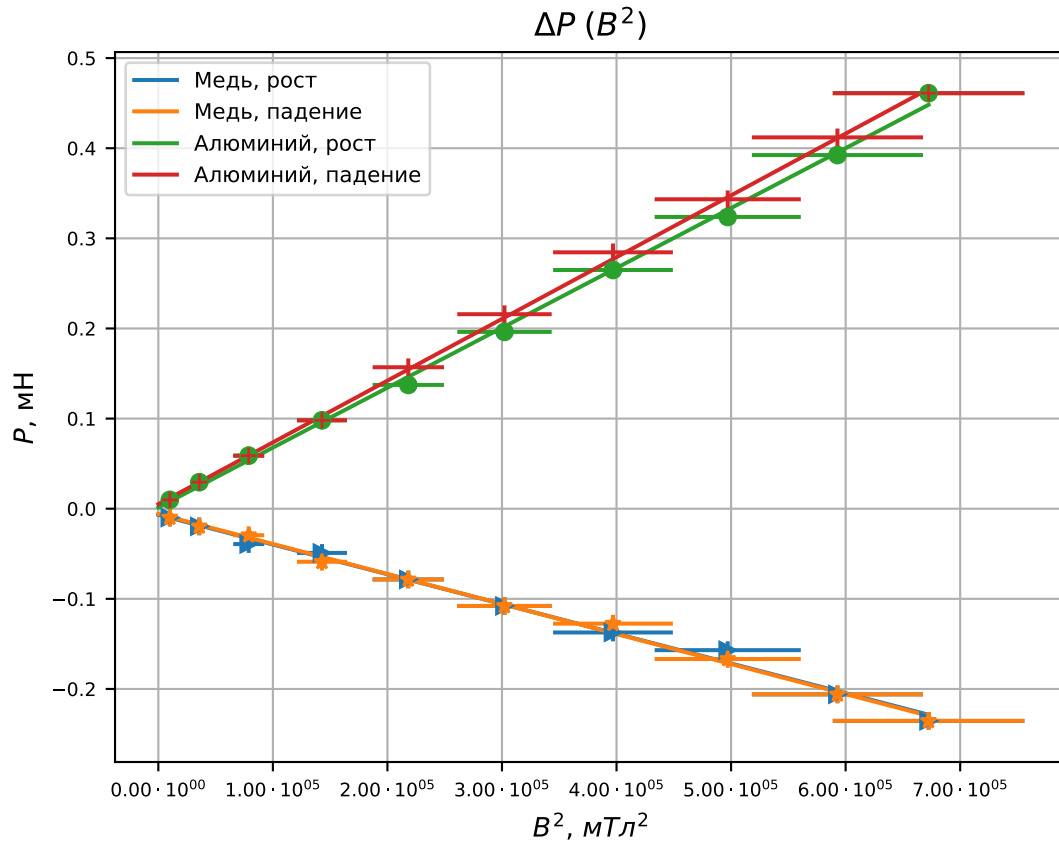


Рис. 4: Зависимость перегрузки  $\Delta P$  от поля в зазоре  $B$  для меди и алюминия

| $\bar{x}$ | $\sigma_x^2$ | $\bar{y}$ | $\sigma_y^2$ | $r_{xy}$  | $a$       | $\Delta a$ | $b$       | $\Delta b$ |
|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|-----------|------------|-----------|------------|
| 2.95e+05  | 5.07e+10     | -1.04e-01 | 5.55e-03     | -1.67e+04 | -3.30e-07 | 8.87e-09   | -6.74e-03 | 3.29e-03   |

Таблица 1: Параметры графика  $\Delta P(B^2)$  для меди

| $\bar{x}$ | $\sigma_x^2$ | $\bar{y}$ | $\sigma_y^2$ | $r_{xy}$ | $a$      | $\Delta a$ | $b$      | $\Delta b$ |
|-----------|--------------|-----------|--------------|----------|----------|------------|----------|------------|
| 2.95e+05  | 5.07e+10     | 1.97e-01  | 2.24e-02     | 3.37e+04 | 6.65e-07 | 1.00e-08   | 1.32e-03 | 3.71e-03   |

Таблица 2: Параметры графика  $\Delta P(B^2)$  для алюминия

На графиках наблюдаем линейную зависимость  $\Delta P$  от  $B^2$ , как и ожидалось из теории. Рассчитаем значения магнитной восприимчивости  $\chi$ :

$$\chi_{Cu} = -(1.08 \pm 0.03) \cdot 10^{-5}$$

$$\chi_{Al} = +(2.17 \pm 0.03) \cdot 10^{-5}$$

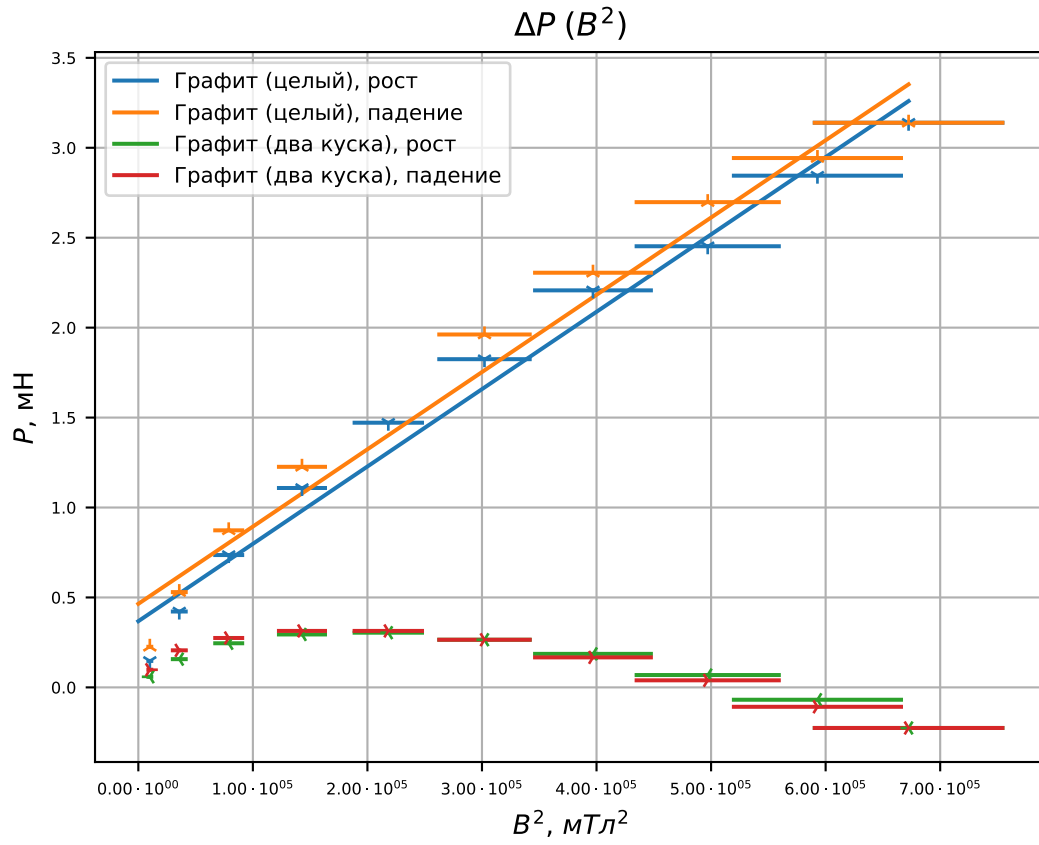


Рис. 5: Зависимость перегрузки  $\Delta P$  от поля в зазоре  $B$  для графита

| $\bar{x}$ | $\sigma_x^2$ | $\bar{y}$ | $\sigma_y^2$ | $r_{xy}$ | $a$      | $\Delta a$ | $b$      | $\Delta b$ |
|-----------|--------------|-----------|--------------|----------|----------|------------|----------|------------|
| 2.95e+05  | 5.07e+10     | 1.64e+00  | 9.56e-01     | 2.18e+05 | 4.30e-06 | 2.16e-07   | 3.68e-01 | 8.00e-02   |

Таблица 3: Параметры графика  $\Delta P(B^2)$  для целого графита

$$\chi_{Gr} = +(2.15 \pm 0.11) \cdot 10^{-4}$$

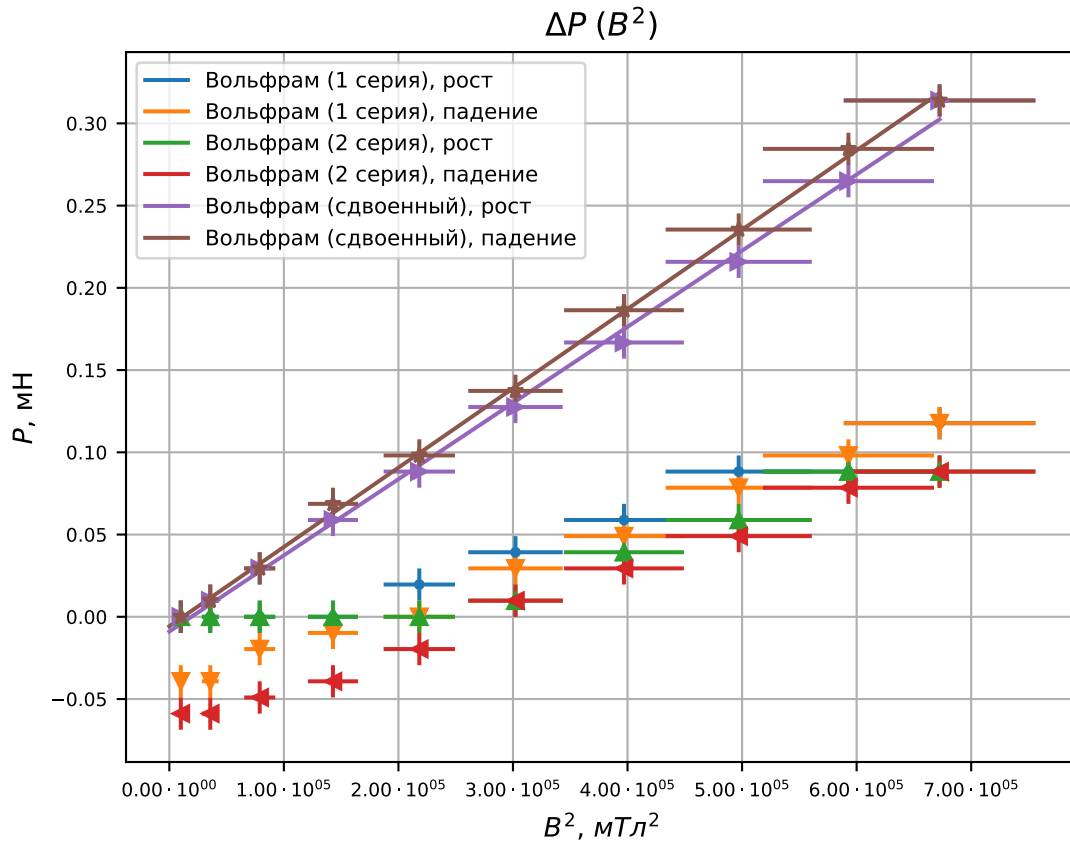


Рис. 6: Зависимость перегрузки  $\Delta P$  от поля в зазоре  $B$  для вольфрама

| $\bar{x}$ | $\sigma_x^2$ | $\bar{y}$ | $\sigma_y^2$ | $r_{xy}$ | $a$      | $\Delta a$ | $b$       | $\Delta b$ |
|-----------|--------------|-----------|--------------|----------|----------|------------|-----------|------------|
| 2.95e+05  | 5.07e+10     | 1.28e-01  | 1.09e-02     | 2.35e+04 | 4.63e-07 | 8.36e-09   | -8.96e-03 | 3.10e-03   |

Таблица 4: Параметры графика  $\Delta P(B^2)$  для сдвоенного образца вольфрама

$$\chi_W = +(7.24 \pm 0.26) \cdot 10^{-5}$$

## Заключение и выводы