

Лабораторная работа №3.4.1  
Диа- и парамагнетики

Рожков А. В.

19 октября 2024 г.

**Цель работы:** измерение магнитной восприимчивости диа- и парамагнитных образцов.

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

## 1 Теоретическая справка

Магнитная восприимчивость тел может быть определена по измерению сил, действующих на тела в магнитном поле. Одним из классических методов таких измерений является т.н. *метод Гюи*. В нём используется длинный тонкий стержень, один из концов которого помещают в зазор электромагнита (обычно в область однородного поля), а другой конец – вне зазора, где величиной магнитного поля можно пренебречь. В этом случае закон изменения поля – от максимального до нулевого – будет несущественен.

Найдём выражение для силы, действующей со стороны магнитного поля на помещённый в зазор электромагнита цилиндрический стержень. Пусть площадь его сечения равна  $S$ , его магнитная проницаемость –  $\mu$ , поле в зазоре –  $B_0$ , а глубина, на которую стержень помещён в зазор, –  $x$ . Так как ток  $I$  через электромагнит остаётся постоянным, то сила, действующая на стержень со стороны магнитного поля, равна производной магнитной энергии системы по координате, взятой с противоположным знаком:

$$F_M = - \left( \frac{\partial W_M}{\partial x} \right)_I,$$

где  $W_M(x)$  – магнитная энергия системы при  $I = \text{const}$  (то есть при  $B_0 = \text{const}$ ) в зависимости от глубины погружения стержня  $x$ .

Объёмную плотность магнитной энергии можно найти по формуле:

$$W_M = \frac{1}{2\mu_0} \int \frac{B^2}{\mu} dV,$$

где интеграл берётся по всему пространству.

Найдём теперь распределение магнитного поля в цилиндре. Рассмотрим сначала бесконечный стержень с проницаемостью  $\mu$ , помещённый в перпендикулярное ему однородное поле  $B_0 = \mu_0 H_0$ , и найдём поле  $B_{\text{ст}}$  внутри него. В силу малости магнитной восприимчивости исследуемых образцов можно воспользоваться непрерывностью касательной компоненты  $H$  и считать, что внутри стержня  $H_{\text{ст}} = H_0$ , потому что  $B_{\text{ст}} = \mu B_0$ . Тогда систему из стержня в зазоре электромагнита можно условно разбить на три части – вне электромагнита (I), в погружённой части стержня (II) и в электромагните вдали от стержня (III). В области I поле мало ( $B_1 \approx 0$ ), поэтому его вкладом в энергию можно пренебречь. В области II поле приближённо равно  $B_2 \approx \mu B_0$ , а в области III –  $B_3 \approx B_0$ .

При смещении цилиндра вглубь электромагнита на  $dx$  область II увеличивается в объёме на  $dV_2 = Sdx$ , а область III уменьшается на  $dV_3 = -Sdx$ . Распределение поля в пограничных участках между областями при этом почти не меняется. Тогда изменение магнитной энергии при таком смещении равно:

$$dW_M(dx) \approx \frac{B_2^2}{2\mu\mu_0} Sdx - \frac{B_3^2}{2\mu_0} Sdx = (\mu - 1) \frac{B_0^2}{2\mu_0} Sdx.$$

Следовательно, искомая сила равна:

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

Знак силы зависит от знака восприимчивости  $\chi = \mu - 1$ : парамагнетики ( $\chi > 0$ ) *втягиваются* в зазор электромагнита, а диамагнетики ( $\chi < 0$ ) *выталкиваются* из него. Таким образом, измерив силу, действующую на образец в магнитном поле  $B_0$ , можно рассчитать его магнитную восприимчивость.

## 2 Экспериментальная установка

Схема установки показана на рисунке 1. Магнитное поле с максимальной индукцией  $\approx 1$  Тл создаётся в зазоре электромагнита, питаемого постоянным током. Диаметр его полюсов существенно превосходит ширину зазора, поэтому поле в его средней части достаточно однородно. Величина тока, проходящего через обмотки электромагнита, задаётся регулируемым источником постоянного тока.

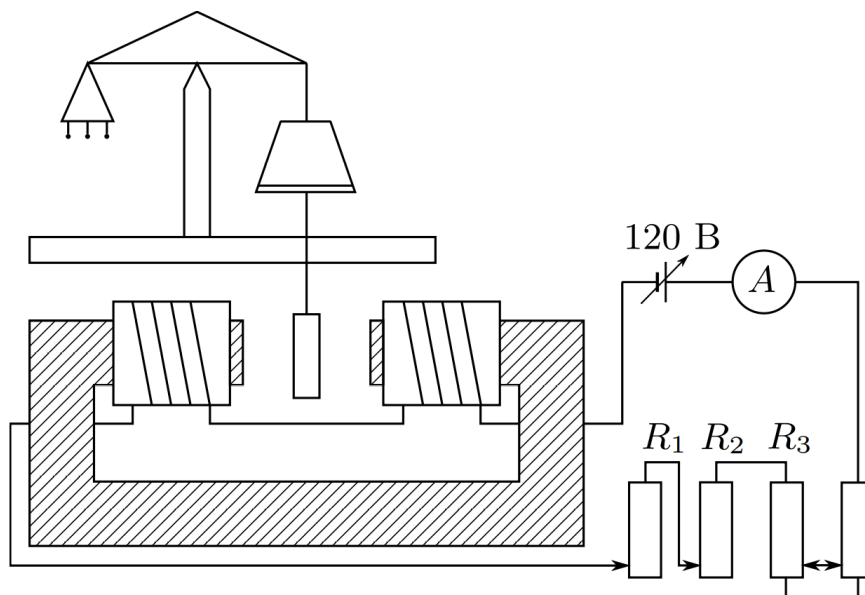


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

Градуировка электромагнита (связь между индукцией магнитного поля  $B$  в зазоре и силой тока  $I$  в обмотках) производится при помощи милливеберметра. При измерениях образцы поочерёдно подвешиваются к аналитическим весам так, что один конец образца оказывается в зазоре электромагнита, а другой – вне его, где индукцией магнитного поля можно пренебречь. При помощи аналитических весов определяется перегрузка  $\Delta P = F$  – сила, действующая на образец со стороны магнитного поля.

Погрешности приборов: милливеберметра – половина цены деления шкалы, т.е.  $\Delta \Phi = 0.05$  мВб, электрических приборов – амперметра и весов –  $0,5\% + 2$  ед. мл. разряда.

## 3 Ход работы

### 3.1 Градуировка электромагнита

При помощи милливеберметра построим градуировочную кривую  $B(I)$ .

### 3.2 Измерения для меди и алюминия

Построим графики  $\Delta P = f(B^2)$ . По наклонам определим магнитную восприимчивость  $\chi$ .

## 4 Вывод

С помощью метода Гюи мы измерили магнитную восприимчивость меди и алюминия и поняли, что медь диамагнетик, а алюминий парамагнетик. Значения магнитной восприимчивости достаточно

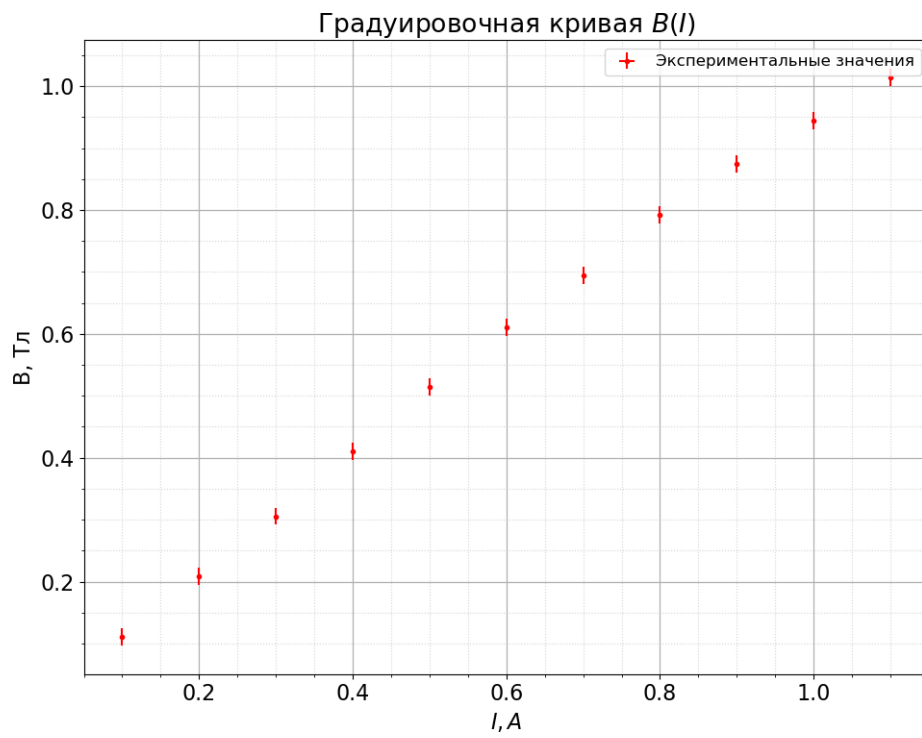


Рис. 2: градуировочная кривая  $B(I)$

Материал	$\chi, 10^{-5}$	$\chi_{\text{табл}}, 10^{-5}$
Cu	$-1.02 \pm 0.02$	-0.92
Al	$2.008 \pm 0.010$	2.3

Таблица 1: Результаты

близки к табличным.

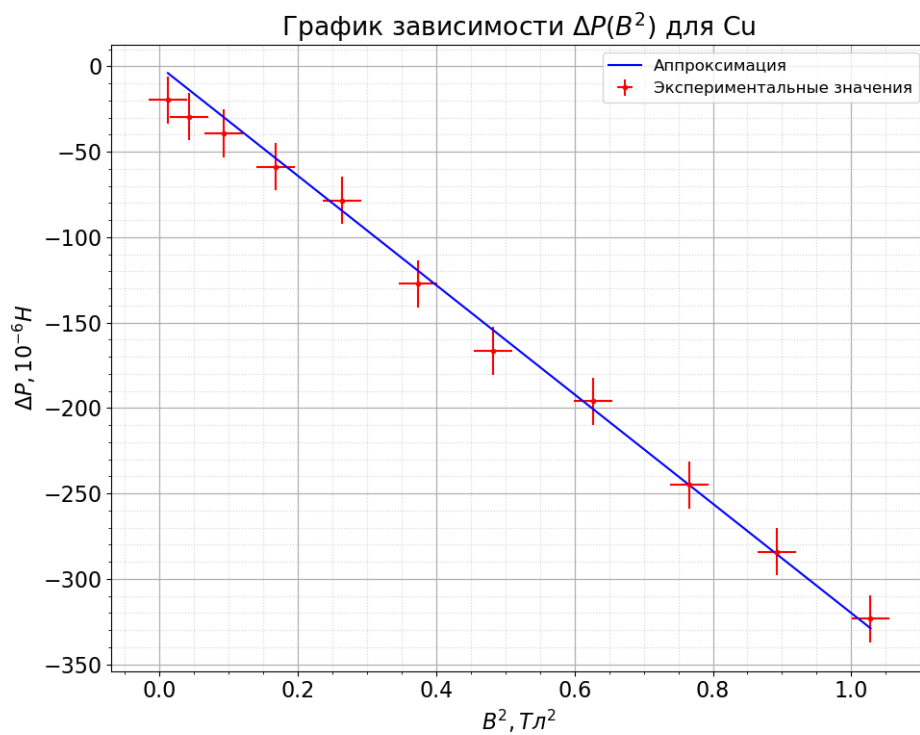


Рис. 3: График  $\Delta P = f(B^2)$  для меди

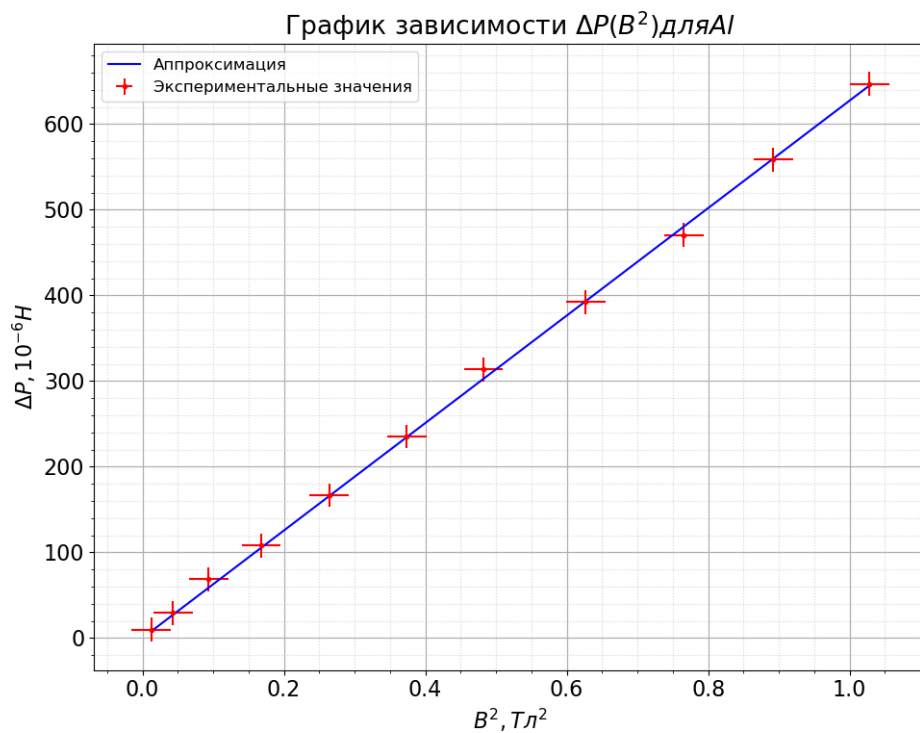


Рис. 4: График  $\Delta P = f(B^2)$  для алюминия