

ДИА- И ПАРАМАГНЕТИКИ

Симанкович Александр

Маслов Артём

Б01-104

29.09.2022

Аннотация

В работе приводится эмпирическая теория диамагнетиков и парамагнетиков. Измеряется магнитная восприимчивость образцов меди, алюминия, графита и вольфрама.

Ключевые слова: диамагнетики, парамагнетики.

Введение

Из опытов известно, что вещество может реагировать на внешнее магнитное поле. Из-за внутренней структуры парамагнетики («усиливают» действие внешнего магнитного поля) и диамагнетики (стараятся «скомпенсировать» внешнее магнитное поле) довольно слабо реагируют с полем. Ферромагнетики, наоборот, проявляют сильное взаимодействие.

Согласно уравнениям Максвелла, магнитное поле создаётся движущимися зарядами. Магнитное поле также создаётся орбитальным движением электронов вокруг атомов и собственным вращением электронов (спином) и ядер. Полноценное описание магнитных свойств вещества возможно только при применении квантовой механики. В данной работе приводится полуклассическая модель магнитного поля в веществе. Предполагается, что электроны и ядра не обладают собственным вращением.

Теория

Магнитное поле на уровне атомов может резко изменяться в пространстве и времени. Такую физическую величину практически невозможно измерить, поэтому рассматриваются физически бесконечно малые объёмы вещества. Такой объём вещества достаточно мал, чтобы его размерами можно было пренебречь, но содержит достаточно большое количество частиц, чтобы магнитное микрополе можно было усреднить.

Для описания усреднённого магнитного поля вводится вектор *намагниченности*, который равен суммарному дипольному моменту единицы объёма. Тогда средняя индукция магнитного поля в данном бесконечно малом объёме равна:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}),$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ - магнитная постоянная.

В простейшем случае намагниченность сонаправлена с вектором напряженности внешнего магнитного поля:

$$\mathbf{B} = \chi \mathbf{H}$$

Коэффициент χ называется магнитной восприимчивостью среды.

Тогда индукция магнитного поля равна:

$$\mathbf{B} = \mu_0(1 + \chi)\mathbf{H} = \mu_0\mu\mathbf{H}$$

Данная модель достаточно груба, по следующим соображениям:

1. \mathbf{M} может быть не сонаправлена с \mathbf{H}
2. Зависимость $\mathbf{M}(\mathbf{H})$ может быть не линейной.
3. \mathbf{M} может зависеть от предыдущих состояниях вещества — явление гистерезиса.

Тем не менее, данная модель дает правильные по порядку результаты.

Наличие внешнего магнитного поля приводит к дополнительному вращению электронов вокруг атомов так, чтобы скомпенсировать внешнее поле. При этом магнитное поле, создаваемое электронами достаточно мало. Такой механизм реакции на внешнее магнитное поле называется диамагнетизмом и он присущ всем веществам. Если диамагнетизм в веществе является основной причиной возникновения намагниченности, то такое вещество называется *диамагнетиком*. Элементарные диполи в диамагнетиках в среднем ориентированы против внешнего магнитного поля, поэтому $\chi < 0$. Медь является диамагнетиком.

Если энергия магнитного взаимодействия соседних атомов мала по сравнению с тепловой энергией, то магнитные моменты ориентированы хаотически. Из квантовой механики известно, что во внешнем магнитном поле магнитным моментам энергетически выгодно ориентироваться по направлению внешнего поля. Вещества, в которых элементарные диполи в основном ориентированы по направлению внешнего поля, называются *парамагнетиками*. Алюминий, вольфрам и графит являются парамагнетиками.

Рассмотрим тонкий, длинный стержень, помещенный во внешнее однородное магнитное поле (рис. 1). Магнитное поле в данной работе создаётся электромагнитом, для того чтобы оно было однородно площадь торцов электромагнита должна быть много больше размеров стержня, и стержень должен быть помещен в середину зазора.

В области *I* магнитное поле пренебрежимо мало, в области *III* оно примерно равно внешнему магнитному полю B_0 . В области *II* согласно рассматриваемой модели магнитное поле равно:

$$\mathbf{B} = \chi \mathbf{H}$$

На границах областей *I* и *II*, *II* и *III* имеют место краевые эффекты, магнитное поле вычисляется сложно, поэтому чтобы ими можно было пренебречь стержень должен быть длинным.

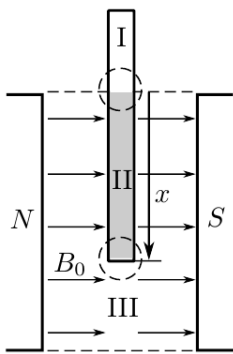


Рис. 1: Стержень во внешнем магнитном поле.

С помощью метода виртуальных перемещений определим силу, действующую на стержень. Пусть длина области II равна x , стержень имеет сечение S .

Определим поле внутри стержня. Вне стержня $B_0 = \mu_0 H_0$. Намагниченный внешним магнитным полем стержень будет вблизи создавать магнитное поле, так, что суммарное поле вблизи стержня в общем случае не будет равно внешнему магнитному полю. Для диа- и парамагнетиков $\chi \ll 1$, следовательно намагниченность стержня мала и поле вблизи него можно считать примерно равным внешнему магнитному полю. Тогда из непрерывности тангенциальной компоненты H при переходе через границу находим, что напряженность внутри стержня $H_{ст} = H_0$, тогда $B_{ст} = \mu B_0$.

Определим объемную плотность энергии поля в диа- и парамагнетиках. Если $\mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H}$, то объемная энергия поля равна:

$$\omega = \int \mathbf{H} d\mathbf{B} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}$$

Рассмотрим бесконечно малое перемещение стержня на dx . Объем области II увеличится на Sdx , объем области III уменьшится на $-Sdx$. Тогда изменение энергии магнитного поля равно:

$$\Delta W = \frac{B_2^2}{2\mu\mu_0} Sdx - \frac{B_3^2}{2\mu_0} Sdx = \chi \frac{B_0^2}{2\mu_0} Sdx$$

Тогда искомая сила, действующая на стержень равна:

$$F = \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right)_{B_0} = \chi \frac{B_0^2}{2\mu_0} S \quad (1)$$

Из формулы (1) следуют, что парамагнетики втягиваются в зазор электромагнита, а диамагнетики выталкиваются.

Схема экспериментальной установки

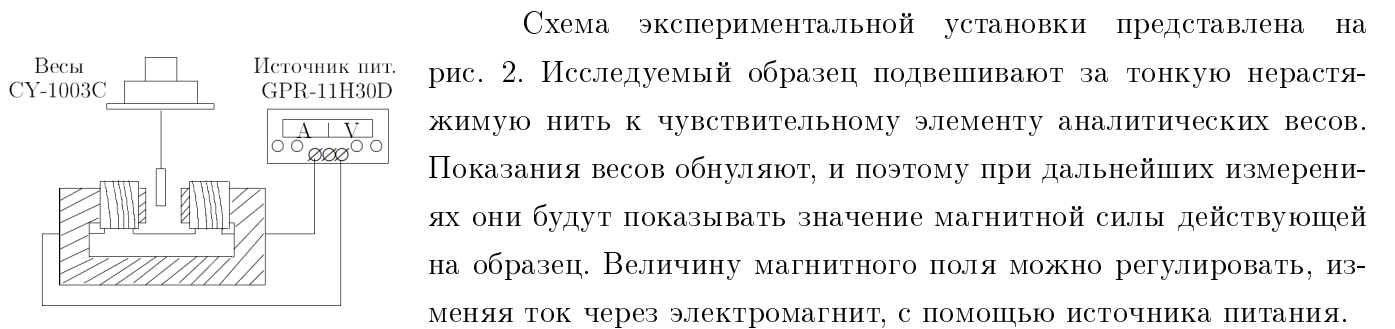


Рис. 2: Схема экспериментальной установки.

Методика измерений

Сначала проводится градуировка электромагнита. Измеряется зависимость магнитной индукции от силы тока $B(I)$. Измерения производятся милливеберметром и миллитесламетром.

После этого для каждого образца измеряют зависимость действующей на образец силы от тока в электромагните $F(I)$. Измерения производятся при увеличении тока от 0 до максимального значения, а затем при уменьшении тока.

Оборудование

1. Электромагнит.
2. Аналитические весы СУ-1003С. Погрешность измерения 10^{-3} г.
3. Милливеберметр М119. Погрешность измерения $\varepsilon = 1,5\%$.
4. Миллитесламетр АТЕ-8702. Погрешность измерения $\pm(5\% + 10 \text{ ед. младшего разряда})$.
5. Регулируемый источник постоянного тока GPR-11H30D. Погрешность измерения $0,5\%$ измеряемой величины $+ 2 \text{ ед. младшего разряда}$.
6. Образцы меди, алюминия, графита и вольфрама.

Экспериментальные результаты

Проведем градуировку электромагнита. Измерения проведем милливеберметром М119 и миллитесламетром АКТАКОМ АТЕ-8702. Погрешности данных приборов:

$$\varsigma_{B6} = (0.015 \cdot \Phi + 0.05) \text{ мВб} \quad \varepsilon_{Тл} = (0.05 \cdot B + 10) \text{ мТл}$$

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

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

На рисунке ниже приведена градуировочная кривая.

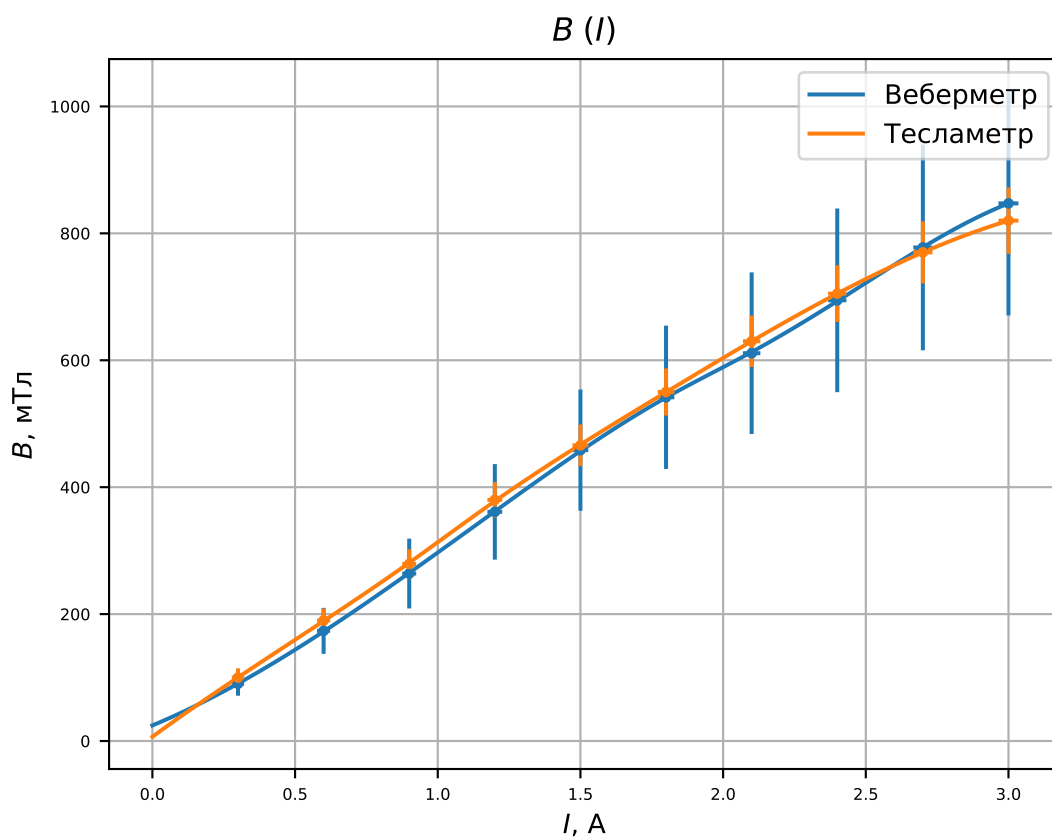


Рис. 3: Зависимость поля в зазоре B от протекающего тока I

Градуировочные графики $B(U)$ совпадают для обоих приборов в пределах погрешности. Зависимость $B(I)$ является не линейной, поэтому последующие измерения будут проводиться при тех же значениях силы тока. Для вычисления значения поля в последующих пунктах используется калибровка с помощью миллитесламетра.

Измерение перегрузок

С помощью аналитических весов определим значения перегрузки ΔP при различных значениях поля B в зазоре электромагнита. Измерения будем проводить как в прямом (*рост*), так и в обратном (*падение*) направлении.

На рисунке ниже приведены зависимости перегрузки от квадрата индукции магнитного поля $P(B^2)$ для меди и алюминия.

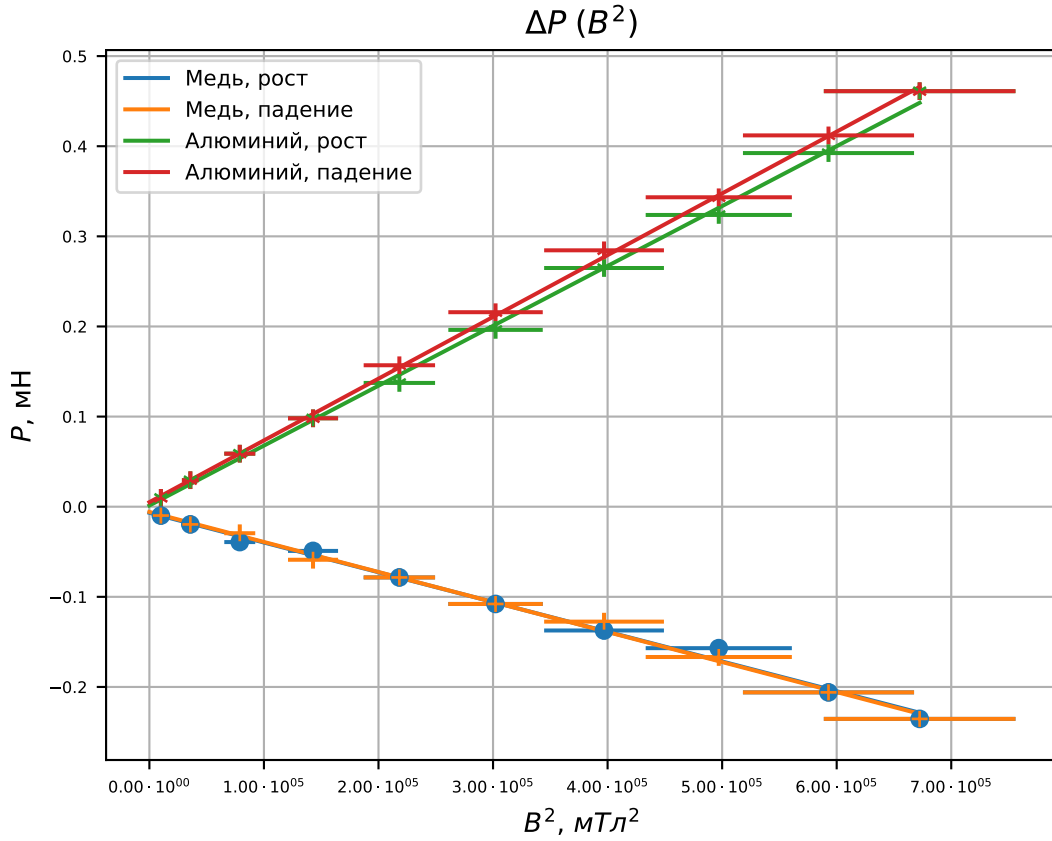


Рис. 4: Зависимость перегрузки ΔP от поля в зазоре B для меди и алюминия

\bar{x}	σ_x^2	\bar{y}	σ_y^2	r_{xy}	a	Δa	b	Δb
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}	σ_x^2	\bar{y}	σ_y^2	r_{xy}	a	Δa	b	Δb
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 ΔP от B^2 , как и ожидалось из теории. Рассчитаем значения магнитной восприимчивости χ :

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

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

На рисунке ниже приведены зависимости перегрузки от квадрата индукции магнитного поля $P(B^2)$ для разных образцов графита.

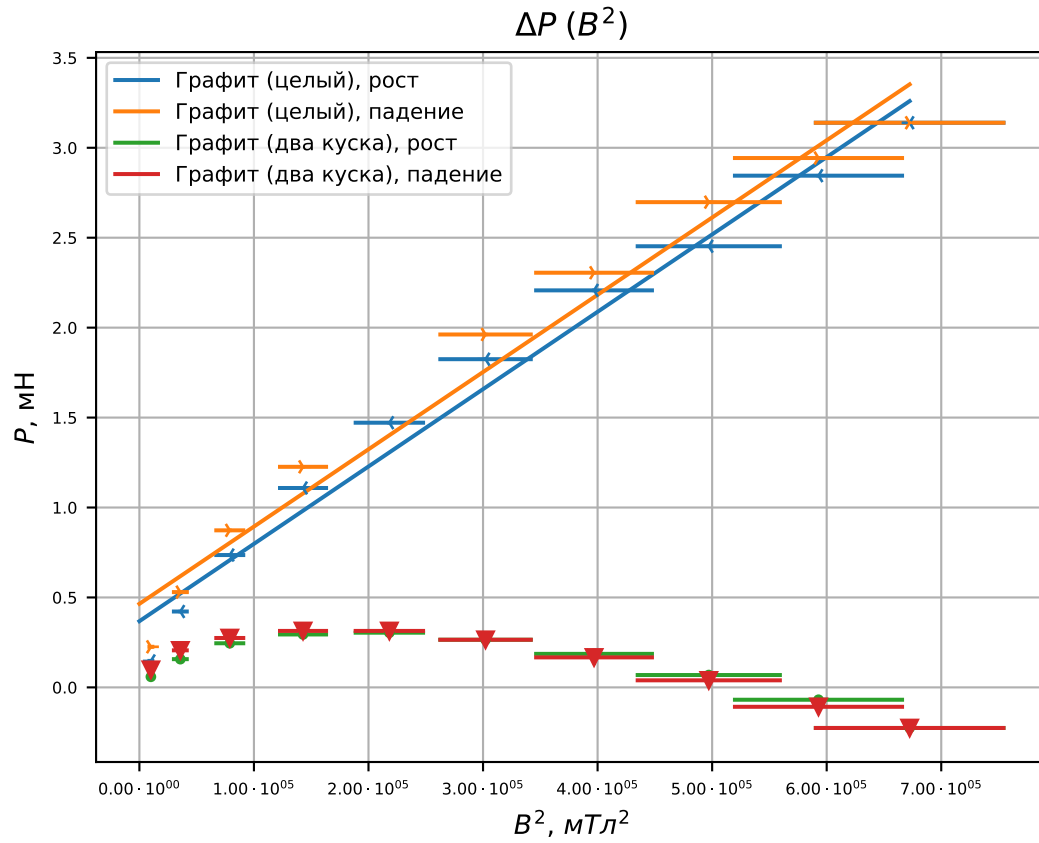


Рис. 5: Зависимость перегрузки ΔP от поля в зазоре B для графита

\bar{x}	σ_x^2	\bar{y}	σ_y^2	r_{xy}	a	Δa	b	Δb
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

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

На рисунке ниже приведены зависимости перегрузки от квадрата индукции магнитного поля $P(B^2)$ для вольфрама.

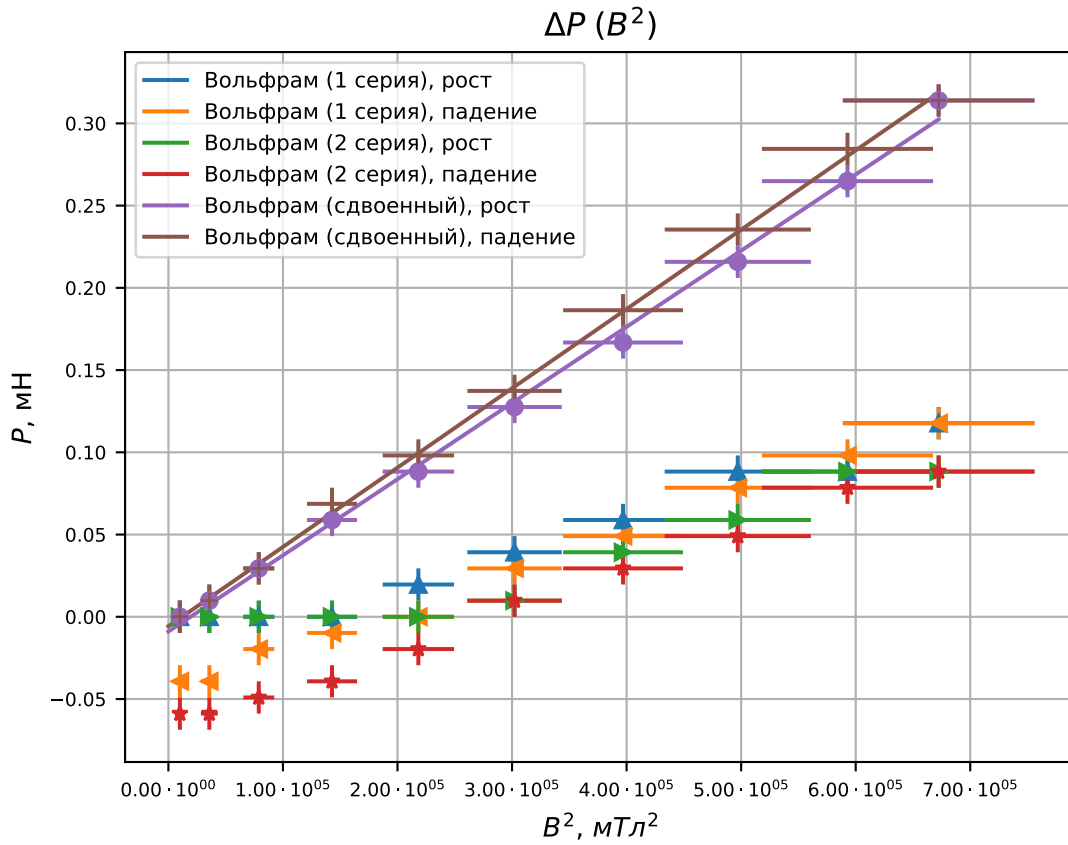


Рис. 6: Зависимость перегрузки ΔP от поля в зазоре B для вольфрама

\bar{x}	σ_x^2	\bar{y}	σ_y^2	r_{xy}	a	Δa	b	Δb
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

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

Выводы

В работе была измерена магнитная восприимчивость:

Медь $\chi = -(1.08 \pm 0.03) \cdot 10^{-5}$.

Алюминий $\chi = +(2.17 \pm 0.03) \cdot 10^{-5}$.

Графит $\chi = +(21.5 \pm 1.1) \cdot 10^{-5}$.

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

Табличные значения:

Медь $\chi = -1.03 \cdot 10^{-5}$.

Алюминий $\chi = +2.3 \cdot 10^{-5}$.

Графит $\chi = +10.5 \cdot 10^{-5}$.

Вольфрам $\chi = +17.6 \cdot 10^{-5}$.

Достаточно точно получилось измерить магнитную восприимчивость для меди и алюминия. Расхождения результатов для графита и вольфрама возможны из-за наличия в веществах примесей, например ферромагнетиков, которые могут значительно повлиять на результат измерения. Также на результат могло повлиять несовершенство используемой модели, которая даёт хорошее качественное описание, но количественное совпадает с более точными моделями только по порядку величины, что и наблюдается для графита и вольфрама.