

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский физико-технический институт
(государственный университет)»

Институт физических проблем им. П.Л. Капицы
Российской Академии Наук

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОГО МОМЕНТА

Дипломная работа бакалавра

Студент 322 группы
Олевский Л.С.

Научный руководитель
д.ф.м.н., проф., в.н.с.
Смирнов Александр Иванович

Москва 2017

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Обзор литературы	6
1.1 Антиферромагнетик $\text{RbFe}(\text{MoO}_4)_2$	6
1.2 Магнитометры	8
1.2.1 Вибрационный магнитометр	8
1.2.2 Высокоточный магнитометр на СКВИДе	11
1.3 АС магнитометр	12
2 Расчёты	16
2.1 Выходное напряжение	16
2.2 Выбор размера образца индия для модельного опыта	17
3 Описание установки и эксперимента	18
3.1 Описание измерительной ячейки	18
3.2 Описание измерительной схемы	19
3.3 Ход эксперимента	19
4 Результаты измерений	21
4.1 Калибровка термометра	21
4.2 Эксперимент в нулевом поле	21
4.3 Эксперимент в ненулевом поле при $T=1,3\text{K}$	22
ВЫВОДЫ	24
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	25
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	27

ПРИЛОЖЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

подавляющее большинство антиферромагнетиков (АФМ) прекрасно описываются классической теорией среднего поля. Исключением из этого являются АФМ с треугольной решёткой, у которых спины не могут минимизировать свою энергию. Такой АФМ называется фрустрированным. В них в этой модели основное состояние получается вырожденным. Для того, чтобы получить какое-то состояние, реализованное в действительности, надо учесть флуктуации в веществе, это так называемый механизм «порядок через беспорядок». Одним из таких АФМ является $\text{RbFe}(\text{MoO}_4)_2$.

Актуальной задачей является выбор измерительного метода, который позволит получить фазовую диаграмму этого вещества. В качестве такого метода был выбран магнитометр по принципу трансформатора (который в литературе принято называть АС магнитометр от английского *alternating current* — переменный ток, так как он получает результаты на частоте).

Целью данной работы было его изготовить и проверить его работоспособность, используя тестовый образец, для того, чтобы выяснить, подходит ли он для дальнейшего использования.

Был проведён анализ литературы, на основе которого ставились требования к магнитометру, проведены необходимые расчёты. После этого этот прибор был изготовлен и собран в измерительную установку. Затем был проведён модельный эксперимент с определённым образцом сверхпроводника (индия), целью которого было проверить работоспособность магнитометра, а также проверить, подходит ли он для изучения $\text{RbFe}(\text{MoO}_4)_2$.

В первой главе обзревается существующая литература: рассматриваются свойства $\text{RbFe}(\text{MoO}_4)_2$, обзревается существующие конструкции магнитометров, а также описываются основное устройство и принцип работы АС магнитометра.

Во второй главе производится расчёт, на основании которого можно получить восприимчивость исследуемого вещества, а также оценивается необходимый размер образца индия для проведения модельного опыта.

В третьей главе описывается экспериментальная установка: устройство измерительной ячейки и общая схема измерительной цепи, также описан ход эксперимента.

В четвёртой главе приводятся экспериментальные данные, производится калибровка термометра на основе рутений-оксида из серии «Турку-Васильев» и вычисляется восприимчивость вещества.

В выводах подводятся итоги проведённого эксперимента.

Глава 1. Обзор литературы

1.1 Антиферромагнетик $\text{RbFe}(\text{MoO}_4)_2$

В [1] исследована зависимость намагниченности образца от температуры в интервале температур от 2,5 до 8 Кельвин. Рисунок 1.1 взят из этой работы.

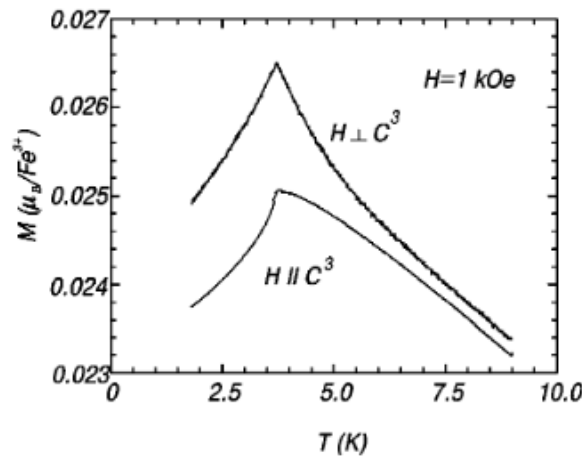


Рисунок 1.1 – Температурная зависимость намагниченности $\text{RbFe}(\text{MnO}_4)_2$ для двух направлений магнитного поля в поле 1кЭ [1]

В работе [2] описывается АФМ с треугольной решёткой в магнитном поле. В чистом АФМ при наличии внешнего поля при температуре 0К могут возникать спиновые возбуждения. Прибавка, возникающая к свободной энергии благодаря таким флуктуациям приведена, например, в [3].

$$\Delta F \approx -\frac{T}{18} \sum_{\langle ij \rangle} (\mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j)^2 \quad (1.1)$$

где T — величина флуктуации температуры, \mathbf{S}_i — величина спина. Знак минус показывает то, что спинам выгоднее всего располагаться антипараллельно. В работе [4] приведен численный расчёт фазовой диаграммы АФ. На рисунке 1.2 показаны результаты, полученные в той работе

Случай, когда в таком АФМ имеются примеси, можно рассматривать, как флуктуацию обменного интеграла δJ^2 . Возникающая поправка к энергии

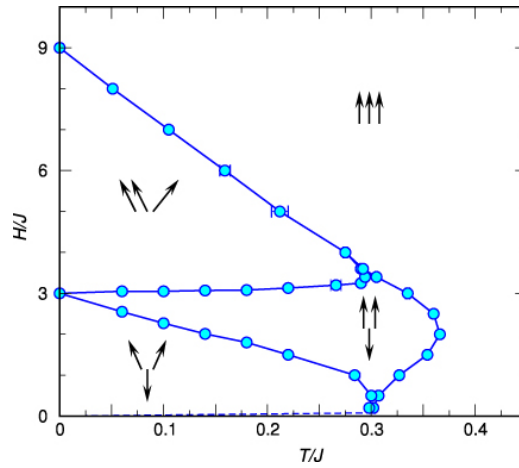


Рисунок 1.2 – Фазовая диаграмма, рассчитанная методом Монте-Карло чистого АФМ [4]

также приведена в работе [3]

$$\Delta E \approx \frac{\delta J^2}{3J} \sum_{\langle ij \rangle} (\mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j)^2 \quad (1.2)$$

где J — обменный интеграл. Прибавка к энергии также представляет собой квадратичную форму, но с противоположным знаком. На рисунке 1.3 приведена фазовая диаграмма при фиксированном количестве примесей и при фиксированном поле при различной чистоте образца (во врезке). В экс-

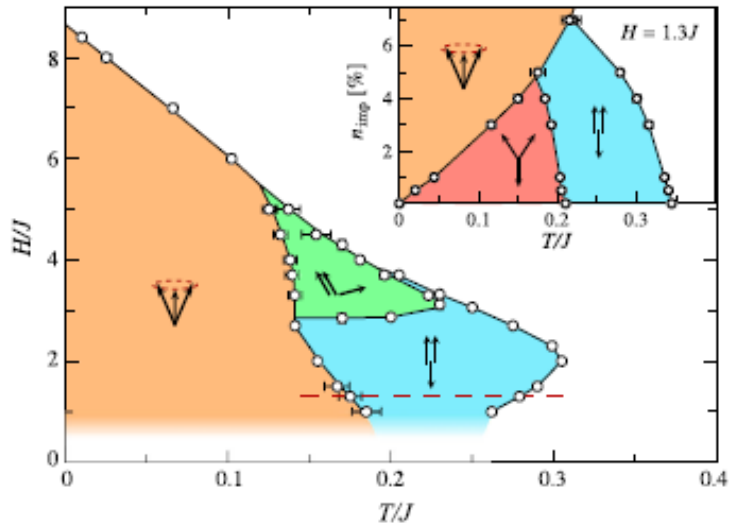


Рисунок 1.3 – Фазовая диаграмма, рассчитанная классическим методом Монте-Карло с 5% немагнитными примесями, на врезке фазовая диаграмма при фиксированном поле [3]

периментальной работе [5] была снята фазовая диаграмма, приведённая на рисунке 1.4.

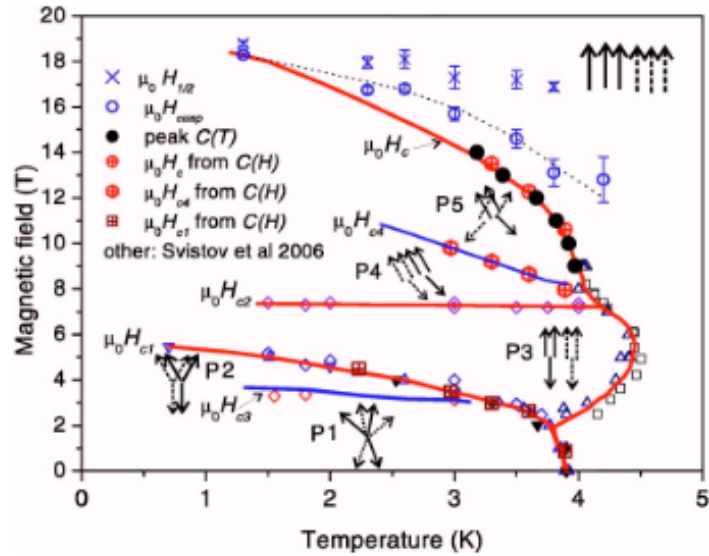


Рисунок 1.4 – Фазовая диаграмма, при H перпендикулярном C^3 [5]

1.2 Магнитометры

Существует множество способов измерения намагниченности. Раскроем наиболее часто использующиеся из них: вибрационный магнитометр и на основе СКВИДа.

1.2.1 Вибрационный магнитометр

Начнём с первого. Основной принцип работы такой конструкции магнитометра описан в статье [6]. Общая схема приведена на рисунке 1.5. Образец (1) вибрирует перпендикулярно приложенному полю. В движение его приводит электро-динамическая система громкоговорителя (1), (2) и (4). Из-за изменяющегося поля в детектирующих катушках (7) наводится напряжение, величина которого связана с магнитным моментом образца. Опорное напряжение получается от опорной катушки (6) с помощью калибровочного образца (4), например, небольшого магнита. Амплитуды напряжений напрямую связаны: отношение напряжений равно отношению магнитных моментов. Благодаря этому, результат нечувствителен к изменению амплитуды или частоты

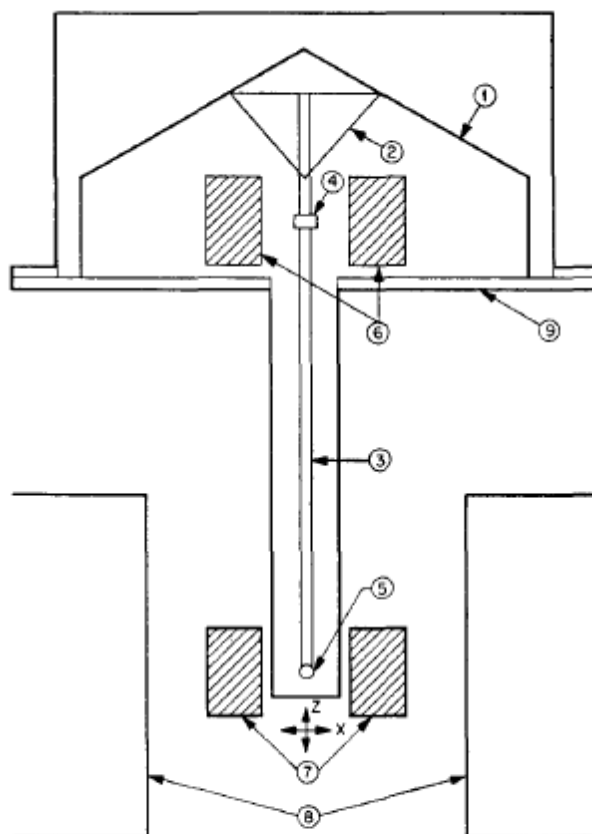


FIG. 1. Simplified form of vibrating-sample magnetometer. (1) loudspeaker transducer, (2) conical paper cup support, (3) drinking straw, (4) reference sample, (5) sample, (6) reference coils, (7) sample coils, (8) magnet poles, (9) metal container.

Рисунок 1.5 – Схема вибрационного магнитометра [6]

вибрации, неоднородности поля. Чувствительность такого прибора очень высока: от $5 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-8}$ эрг/Гс. Так как прямые расчёты невозможны для точного вычисления, для определения чувствительности прибора в [6] для определения чувствительности проводился модельный эксперимент с никелевой сферой массой примерно 8 мг, магнитный момент которой находится в насыщении. Для такого эксперимента изменения в восприимчивости, отнесённой к одному грамму в поле 10 кГс получалась $\Delta\chi \approx 5 \cdot 10^{-10}$.

На рисунке 1.7 приведена изменяющаяся часть поля. Из него следует, какие именно положения детектирующих катушек являются самыми оптимальными, для измерения возникающего квадрупольного поля. Возможные положения приведены на рисунке 1.8 Самая распространённая конфигурация — это конфигурация а, так как наличие двух катушек, с одной стороны, усиливает сигнал, с другой стороны, такое положение просто для изготовле-

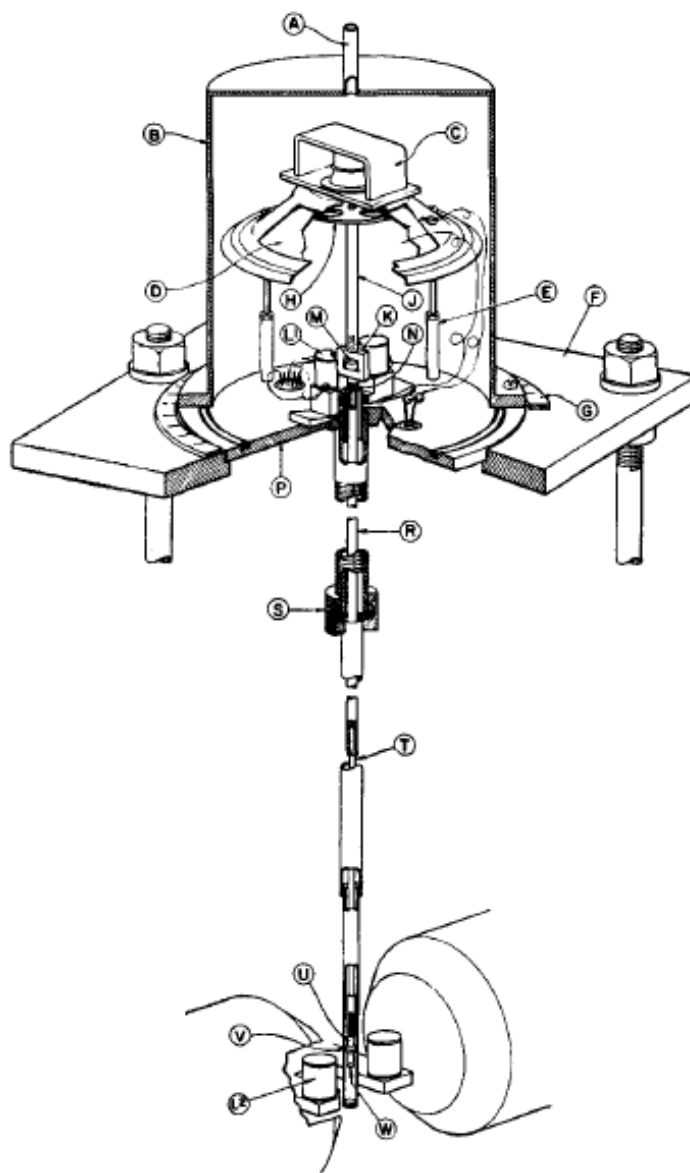


Рисунок 1.6 – Подробная конструкция вибрационного магнитометра [6]

ния.

Основные источники погрешности — это, во-первых, дробовой и тепловой шум, во-вторых, изменение положения образца и катушек из-за вибрации. Чтобы бороться с последним, катушку стараются поместить в седловую точку функции выходного напряжения от положения катушки. На рисунке 1.9 приведён график, использовавшийся в [6] для определения седловой точки. Тогда небольшие относительные смещения практически не повлияют на показания. Таким образом может быть достигнута относительная погрешность измерений порядка 0,5% и чувствительность в $\Delta\chi \approx 5 \cdot 10^{-10}$ (отнесённая к одному грамму в поле 10кГц).

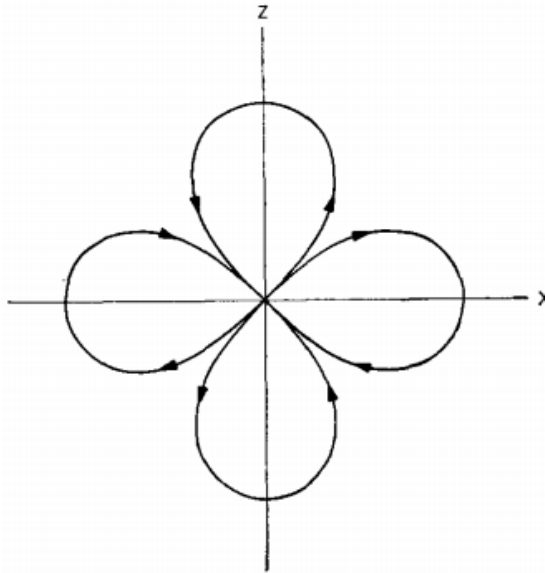


Рисунок 1.7 – Общий вид меняющегося поля в плоскости $X - Z$ [6]

Этот магнитометр, например, использовался в [7] для исследования магнитного момента нагретого кристалла феррита кобальта

1.2.2 Высокоточный магнитометр на СКВИДе

Второй популярный магнитометр — СКВИД. Конструкция высокоточного магнитометра описана здесь [8]. Она представлена на рисунке 1.10. Многоканальная система состоит из 18 магнитометров как показано на рисунке 1.10(d). СКВИДы соединены с источником питания через трансформаторы. Приёмные катушки различных размеров разделены на два уровня, как видно из 1.10(b). В нижнем уровне для приёма z -компоненты поля B состоит из 7 круглых катушек и одной шестигранной, опоясывающей их. Опорные магнитометры для этой компоненты расположены на верхнем уровне. Компоненты x и y поля измеряются 3 парами катушек в нижней части и одной парой в верхней.

Чувствительность такого прибора определяется шумом в цепи. В работе [8], определяя чувствительность по полю, как $B_{Phi} = L_{tot}/(M_{in}A_p)$, где L_{tot} — индуктивность входной цепи, (M_{in} — коэффициент взаимной индукции между сквидом и питающей катушкой и A_p — площадь чувствительной к полю области приёмной катушки. Итоговая чувствительность получилась $890\text{pT}/\Phi_0$ и $88,3\text{pT}/\Phi_0$ для маленькой и большой катушки нижнего уровня соответствен-

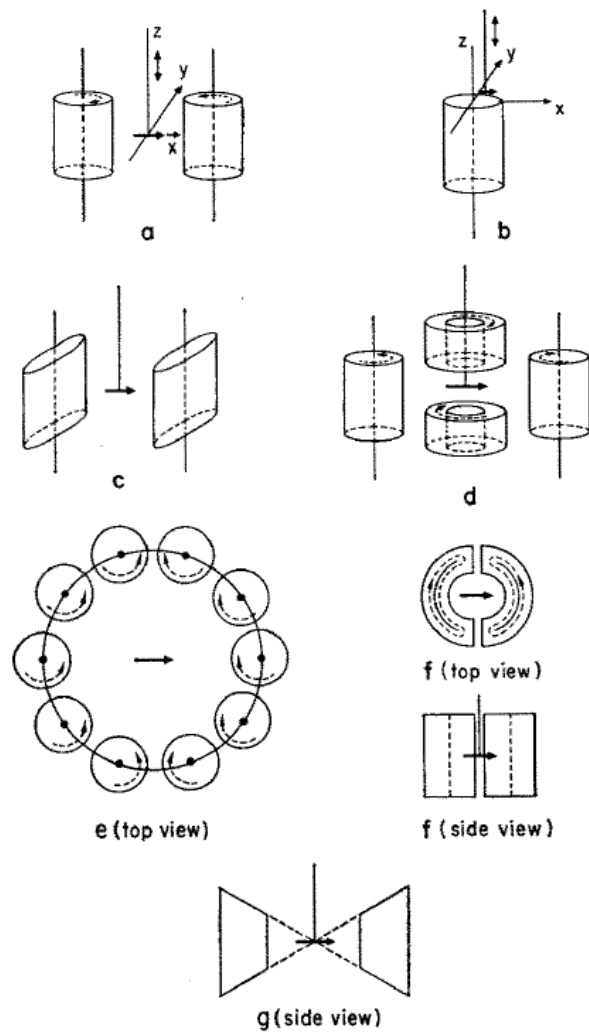


Рисунок 1.8 – Различные положения катушек [6]

но, и $780\text{pT}/\Phi_0$ и $86,4\text{pT}/\Phi_0$ для маленькой и большой катушки верхнего уровня, где Φ_0 — квант потока.

1.3 АС магнитометр

В работах [9] и [10] описан общий вид такого магнитометра. На рисунке 1.11 приведены различные возможные конфигурации такого магнитометра. В данной работе использовалась конфигурация В, подробнее описанная ниже.

В основе этого типа магнитометра лежит принцип действия трансформатора. Две внутренние катушки соединены навстречу друг другу, чтобы компенсировать индуцированный ток. В идеальном случае они полностью компенсируют друг друга, но обычно из-за разной плотности намотки, разной

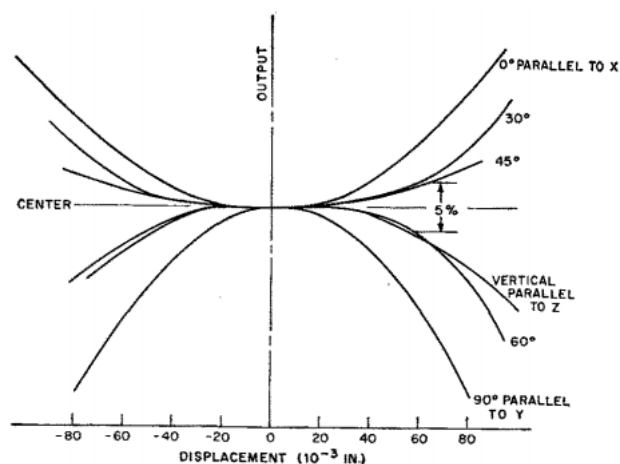


Рисунок 1.9 – Выходной сигнал от положения [6]

площади витков и физических деформаций ток не полностью компенсируется. Желательно добиться разбаланса, чтобы возникший ток составлял не более чем $1/N$, где N — число витков во вторичной обмотке от тока, который индуцируется во вторичной катушке. Тогда, при внесении образца с магнитной восприимчивостью, изменится индуктивность измерительной катушки и на основе возникшего напряжения можно вычислить, какая магнитная восприимчивость.

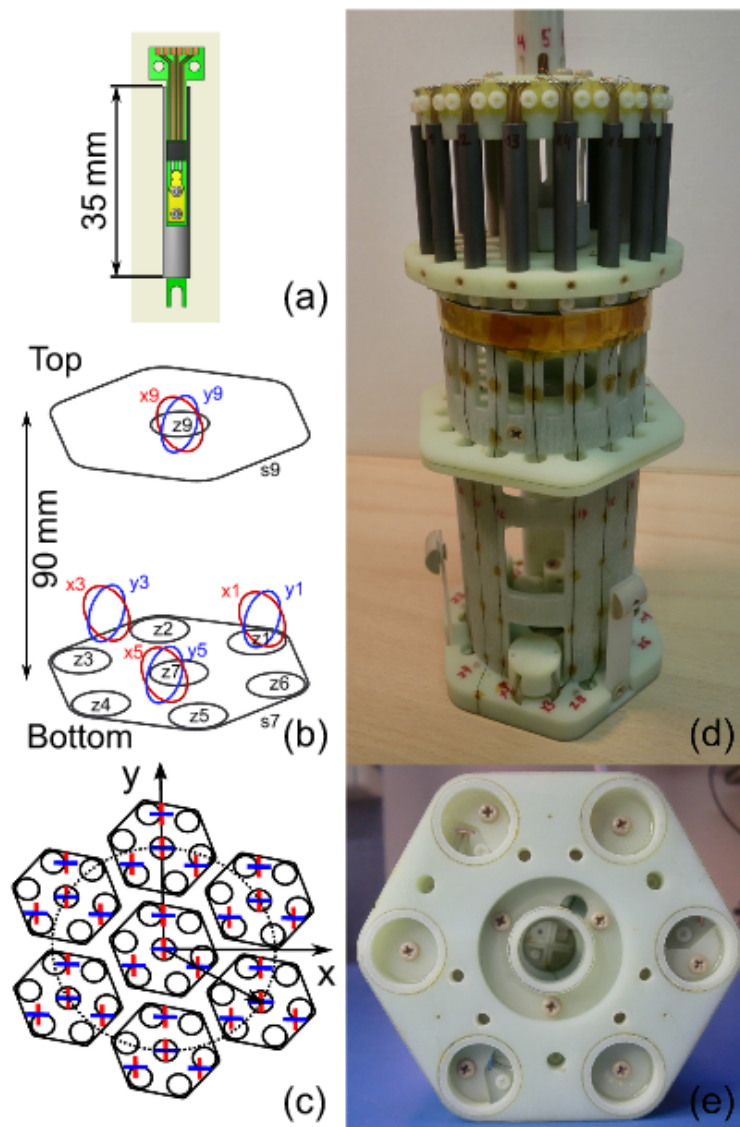


Рисунок 1.10 – Схема упаковки СКВИДов (а), схема сенсоров (b), вид сверху на расположение семи модулей (с), фотография прототипа модуля (d) и вид снизу на 7 маленьких колец, кружённых большим кольцом шестиугольной формы [8]

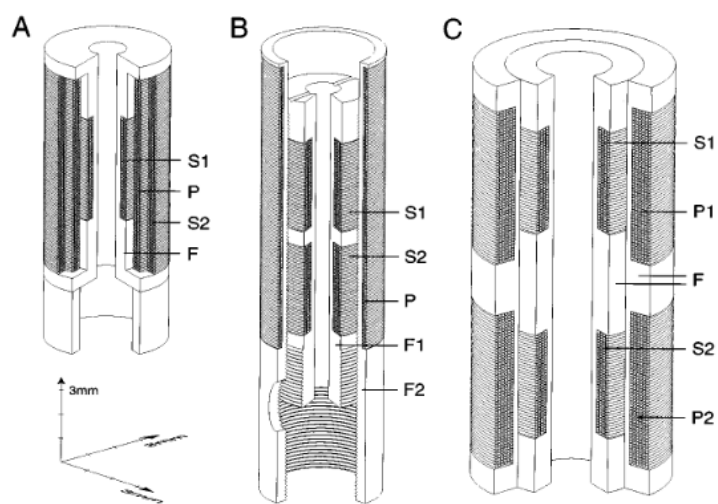


Рисунок 1.11 – Различные виды АС магнитометра (P – первичная катушка (P1 и P2 для случая когда первичных катушек две), S1 и S2 – вторичные соответственно, F, F1, F2 – каркас) [9]

Глава 2. Расчёты

2.1 Выходное напряжение

Для того, чтобы определить, какая у нас возникнет прибавка к ЭДС при внесении образца с восприимчивостью χ , рассмотрим более упрощённую задачу: в трансформатор, первичная обмотка которого по параметрам совпадает с первичной катушкой магнитометра, а вторичная обмотка с приёмной катушкой магнитометра, вносят образец с известной восприимчивостью.

Как известно, поле соленоида даётся следующей формулой (здесь и далее, если явно не указано, формулы в СГС):

$$B = \frac{4\pi NJ}{c l}$$

где N — число витков, l — длина катушки, а J — ток. Соответственно поле, создаваемое первичной катушкой,

$$B_1 = \frac{4\pi N_1 J_{10} \sin(\omega t + \varphi_0)}{c l_1} \quad (2.1)$$

где J_{10} — амплитуда тока через катушку 1.

Закон Ома для нашей цепи в СИ

$$J = \frac{U_0}{R^2 + \omega^2 L^2} (R \cos \omega t + \omega L \sin \omega t)$$

Следовательно

$$J_{10} = \frac{U_0}{\sqrt{R_1^2 + \omega^2 L_1^2}} \quad (2.2)$$

Индуктивность соленоида даётся формулой в СИ

$$L = \mu_0 \frac{N^2 S}{l} \quad (2.3)$$

Теперь найдём, какая возникнет добавка к полю при внесении в приёмную катушку (катушка 2) тонкого цилиндра с восприимчивостью χ . Дополнительный поток через катушку будет $\Delta\Phi = N_2 \frac{l_3}{l_2} \Phi_3$, где Φ_3 — поток, создаваемый χ в переменном поле. Воспользуемся теоремой о взаимности. Представим внесённый магнитный момент как виток с током. Тогда $\Phi_3 = \frac{4\pi JS_3}{l_3 l_3}$,

где J — эффективный ток в этом соленоиде. Связь этого тока с полем будет с $\frac{JS_3}{c} = V_3\chi B$, где V_3 — объём образца. Отсюда прибавка к потоку будет $\Delta\Phi_0 = 4\pi N_2 \frac{1}{l_2} B_{10}\chi V_3$. А прибавка к ЭДС будет

$$\Delta\varepsilon_{20} = \frac{\omega}{c}\Delta\Phi_0 = \frac{4\pi\omega}{c}N_2 \frac{1}{l_2}\chi B_{10}V_3 \quad (2.4)$$

Используя выражение (2.4) и (2.1) получаем выражение для искомой восприимчивости

$$\chi = \alpha \frac{\Delta\varepsilon_{20}}{U_{10}} \quad (2.5)$$

где в такой схеме $\alpha = \left(\frac{c}{4\pi}\right)^2 \frac{l_1 l_2}{V_3} \frac{1}{N_1 N_2} \frac{\sqrt{R_1^2 + \omega^2 L_1^2}}{\omega}$. Это выражение по виду совпадает с, например, [11]

2.2 Выбор размера образца индия для модельного опыта

Используя данные статьи [1], имеем для $\text{RbFe}(\text{MoO}_4)_2$ следующие данные: параметры элементарной ячейки $a = b = 5,69\text{\AA}$, а $c = 7,48\text{\AA}$. Также на одну элементарную приходится один ион железа. При температурах от 2,5 до 8 Кельвин в поле 1кЭ следуя рисунку 1.1, на каждый ион приходится магнитный момент $0,025\mu_B$. Объём элементарной ячейки $V_{\text{э.я.}} = 0,5abc \sin \frac{\pi}{3} \approx 104,86 \cdot 10^{-24}\text{см}^3$. Отсюда $\chi = \frac{0,025 \cdot 0,927 \cdot 10^{-20}}{1\text{кЭ} \cdot V_{\text{э.я.}}} \approx 0,0022\text{ед. СГС}$. Мы хотим для нашего модельного опыта взять такое количество индия, чтобы его диамагнитная восприимчивость дала бы такой же вклад, как от 10мг $\text{RbFe}(\text{MnO}_4)_2$. Следовательно, надо взять образец индия, удовлетворяющий соотношению $V\chi = V_{\text{In}}\chi_{\text{In}}$. Так как $\rho = \frac{m_{\text{э.я.}}}{V_{\text{э.я.}}} = \frac{461\text{а.е.м.} \cdot 1,66 \cdot 10^{-24}\text{Г/а.е.м.}}{V_{\text{э.я.}}} \approx 7,2\text{Г/см}^3$, то $V = m/\rho = 0,01/7,2 \approx 0,0014\text{см}^3$. Отсюда получаем, что $m_{\text{In}} = \rho_{\text{In}} V_{\text{In}} = \rho_{\text{In}} \frac{V\chi}{4\pi} \approx 2,8\text{мг}$.

Для проверки работы магнетометра был использован кусочек индия массой 0,0032г.

Глава 3. Описание установки и эксперимента

3.1 Описание измерительной ячейки

Измерительная ячейка представляет собой одну внешнюю катушку (ПК) и три вторичные катушки: измерительная (ИК), компенсационная (КК) и юстировочная (ЮК). На рисунке 3.1 приведено схематичное изображение. Для намотки использовалась медь толщиной 0,1мм с $RRR = 113$ (*residual*

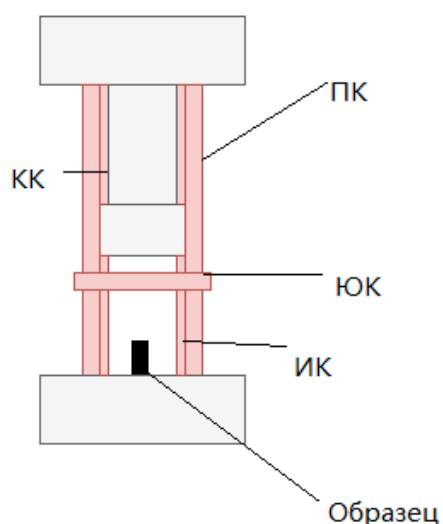


Рисунок 3.1 – Схематичное изображение измерительной ячейки

resistance rate). Параметры катушек следующие: число витков в первичной катушке 1509 витков, вторичные по 406 витков, юстировочная — 15 витков. Число витков в юстировочной катушке подбиралось таким, чтобы разбаланс между катушками был бы не более 1/400, чего удалось достичь при комнатной температуре. Размеры вторичных катушек 5мм, первичной — 17мм, радиус 3мм и 6мм соответственно. В приложении на рисунке П.1 и рисунке П.2 приведены соответствующие размеры.

3.2 Описание измерительной схемы

Общая схема измерения приведена на рисунке 3.2. Для питания исполь-

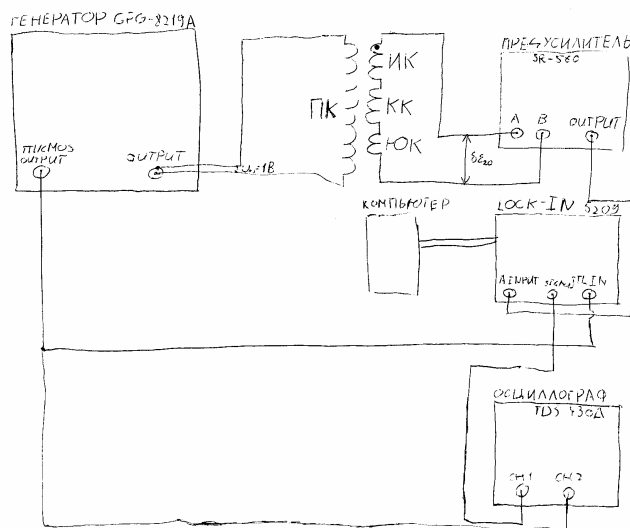


Рисунок 3.2 – Электрическая схема измерения

зуется звуковой генератор амплитудой 1В на частотах 5 и 10кГц. Схема цепи приведена на рисунке 3.2. Жирной точкой отмечено положение образца. Вторичные катушки измерительной ячейки подключены последовательно к предусилителю, работающему в режиме $U_A - U_B$, который усиливает сигнал в 100 раз и фильтрует частоты, оставляя диапазон 3-10кГц, далее он подключён к Lock-In-у, данные с которого считываются компьютером.

3.3 Ход эксперимента

После охлаждения установки до гелиевых температур был промерен несколько раз переход индия в сверхпроводящее состояние с помощью нагрева измерительной ячейки. Установка приведена на рисунке 3.3. Термометр подключён 4-х контактным способом к вольтметру KEITHLEY, нагреватель к источнику тока. Нагрев производился путём изменения силы тока через нагреватель. Затем, при температуре 1,2К, изменяя магнитное поле соленоида с помощью регулирования подаваемой силы тока, был также зафиксирован

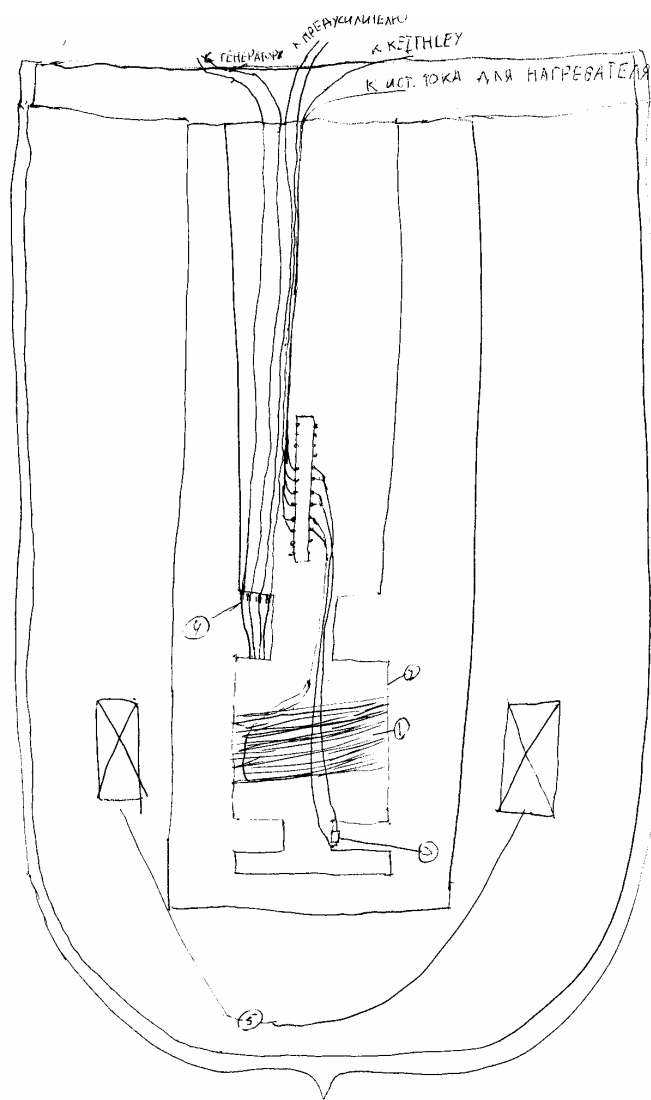


Рисунок 3.3 – Схема установки, 1 – нагреватель, 2 – измерительная ячейки, 3 – термометр, 4 – коаксиалы, идущие от катушек, 5 – соленоид

сверхпроводящий переход в индии. Также была сняты показания термометра для дальнейшей его калибровки.

Глава 4. Результаты измерений

4.1 Калибровка термометра

При проведении эксперимента был прокалиброван фабричный термометр на основе рутений-оксида из серии «Турку-Васильев», которую можно увидеть на рисунке 4.1. Данная кривая в большой степени совпадает с уже прока-

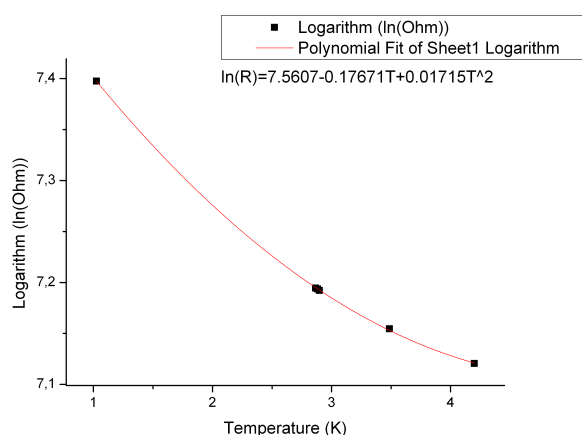


Рисунок 4.1 – Калибровка термометра.

либрованными термометрами. Используя метод наименьших квадратов для полученных точек, получаем уравнение кривой

$$\ln R = 7,5607 - 0,17671T + 0,01715T^2 \quad (4.1)$$

4.2 Эксперимент в нулевом поле

Была снята зависимость показаний выходного напряжения от температуры при выключенном поле. На рисунке 4.2 можно увидеть, как менялись показания прибора вблизи температуры сверхпроводящего перехода. Значения температуры были получены, используя уравнение (4.1). По этому графику видно, что температура сверхпроводящего перехода получилась в окрестности 3,25К, что не соответствует табличному значению: 3,4К, следовательно калибровка термометра произведена недостаточно хорошо.

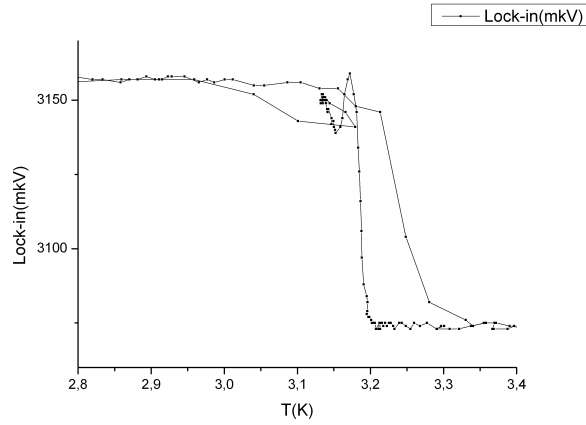


Рисунок 4.2 – Зависимость показаний магнитометра от температуры.

Также на основе этого графика можно посчитать восприимчивость. Скачок напряжения $\Delta V = 87 \text{ мкВ}$. Сопротивление подводящих проводов примерно $13,6 \text{ Ом}$, сопротивление проводов в первичной обмотке $0,54 \text{ Ом}$ при гелиевой температуре. Используя (2.2). Подставляя параметры образца и скачок напряжения в (2.5) получаем в результате измеренное $\chi = 0,052$. Далее, так как наш образец в приближении представляет собой цилиндр с отношением длины к диаметру $l/d = 5,19$, то, воспользовавшись [12] и учтя размагничивающий фактор, $\chi_0 = \frac{\chi}{1-4\pi D\chi}$, где D – размагничивающий фактор, получаем $\chi_0 = 0,055$, где χ_0 обозначена истинная магнитная восприимчивость.

4.3 Эксперимент в ненулевом поле при $T=1,3\text{К}$

Также была снята зависимость и от магнитного поля. На рисунке 4.3 результаты этого измерения. Из графика видно, что отношение скачка напряжения к напряжению при отсутствии сверхпроводимости составляет 3%. Первый скачок обусловлен переходом индия из сверхпроводящего в нормальное состояние, второй – переходом оловянных спаев.

На основе этого графика также можно опеределить какая восприимчивость у индия и насколько этот результат совпадает с известным. Скачок напряжения $\Delta V = 92 \text{ мкВ}$. Подставляя параметры образца и скачок напряжения в (2.5) получаем в результате измеренное $\chi = 0,055$. Так как образец представлял собой цилиндр ($l/d = 5,19$), то, с учётом размагничивающего фактора, используя [12], получаем истинную магнитную восприимчивость

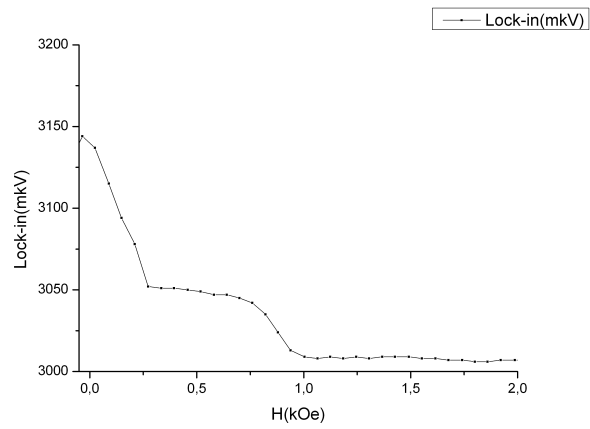


Рисунок 4.3 – Зависимость показаний магнитометра от внешнего поля 0,058. Этот результат хорошо совпадает с тем, который получен из измерения магнитной восприимчивости в нулевом поле.

ВЫВОДЫ

Полученные данные по порядку величины совпадают с известными фактами. Так, ошибка измерения температуры сверхпроводящего перехода составила всего 5%, причина лежит в недостаточном количестве экспериментальных точек для хорошего построения калибровочной кривой. Результаты измерений как в нулевом поле, так и при внешнем совпадают с хорошей точностью. Ошибка в отличии полученной восприимчивости от $\frac{1}{4\pi}$ может заключаться в, во первых, в отличии формы образца от цилиндрической, во вторых, в том, что он не был направлен строго вдоль поля.

Таким образом, можно сказать, что используемый в этой работе магнетометр подходит для дальнейшего использования, но требует улучшения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы был проведён анализ существующей литературы: основные свойства фрустрированного АФМ с треугольной подрешёткой $(\text{RbFe}(\text{MoO}_4)_2)$ и существующие магнитометры. На основании этого был изготовлен АС магнитометр с заданными параметрами. Далее был проведён модельный эксперимент с небольшим кусочком сверхпроводника. Обработав результаты эксперимента, можно подвести итог, что изготовленный магнитометр подходит для будущих измерений $\text{RbFe}(\text{MoO}_4)_2$, но требует доработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. L. E. Svistov, A. I. Smirnov, L. A. Prozorova, O. A. Petrenko, L. N. Demianets, and A. Ya. Shapiro. Quasi-two-dimensional antiferromagnet on a triangular lattice $\text{RbFe}(\text{MoO}_4)_2$. *Phys. Rev. B*, 67(9), mar 2003.
2. AV Chubokov and DI Golosov. Quantum theory of an antiferromagnet on a triangular lattice in a magnetic field. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 3(1):69, 1991.
3. VS Maryasin and ME Zhitomirsky. Triangular antiferromagnet with nonmagnetic impurities. *Physical review letters*, 111(24):247201, 2013.
4. M. V. Gvozdikova, P. E. Melchy, and M. E. Zhitomirsky. Magnetic phase diagrams of classical triangular and kagome antiferromagnets.
5. A. I. Smirnov, H. Yashiro, S. Kimura, M. Hagiwara, Y. Narumi, K. Kindo, A. Kikkawa, K. Katsumata, A. Ya. Shapiro, and L. N. Demianets. Triangular lattice antiferromagnet $\text{RbFe}(\text{MoO}_4)_2$ in high magnetic fields. *Physical Review B*, 75(13), apr 2007.
6. Simon Foner. Versatile and sensitive vibrating-sample magnetometer. *Review of Scientific Instruments*, 30(7):548–557, jul 1959.
7. S Foner and JO Artman. Magnetization processes in heat-treated single crystal cobalt ferrite. *Journal of Applied Physics*, 29(3):443–444, 1958.
8. JH Storm, D Drung, M Burghoff, and R Körber. A modular, extendible and field-tolerant multichannel vector magnetometer based on current sensor squids. *Superconductor Science and Technology*, 29(9):094001, 2016.
9. C. Pfeleiderer. Miniature ac susceptometers for use inside clamp type pressure cells. *Review of Scientific Instruments*, 68(3):1532–1535, mar 1997.
10. Laurent Cevey. Miniature ac susceptometer. *Infoscience*, 2009.

11. Ronald B Goldfarb and JV Minervini. Calibration of ac susceptometer for cylindrical specimens. *Review of scientific instruments*, 55(5):761–764, 1984.
12. Lake Shore Cryotronics, Inc. *Lake Shore Cryotronics, Inc. Model 7000 AC Susceptometer manual*, 1989.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Изделие: магнетометрическая ячейка
Деталь: Каркас катушки
Материал: стеклотекстолит (предпочтительно), гетинакс
Количество: 1 шт.
М 4:1

Глазков, Смирнов: 396, 522

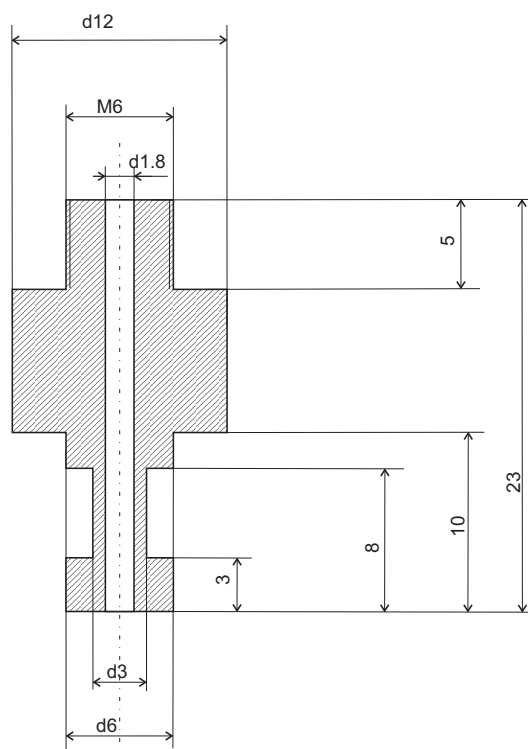


Рисунок П.1 – Одна из несущих деталей катушки

Глазков, Смирнов: 396, 522

Изделие: магнетометрическая ячейка

Деталь: Щечка катушки

Материал: стеклотекстолит (предпочтительно), гетинакс, то же что и у каркаса катушки

Количество: 1 шт.

M 4:1

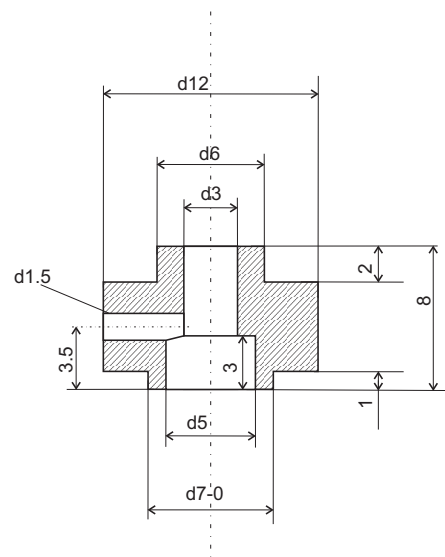


Рисунок П.2 – Вторая из несущих деталей катушки