

ЛИЦЕЙ № 1580 при МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

Лабораторный практикум по общей физике  
(электричество и магнетизм)

## **Измерение магнитного поля соленооида датчиком Холла**



Москва 2012

## Технические методы получения постоянных магнитных полей.

Получение однородного магнитного поля в определенном объеме – это задача, часто встречающаяся в постановке физического эксперимента. В зависимости от требуемой величины магнитной индукции  $B$ , размеров рабочей области, расходуемой мощности, веса и конструктивных требований эта проблема решается разными способами. Однородное магнитное поле может быть создано с помощью катушек Гельмгольца, постоянных магнитов и соленоидов в т. ч. и сверхпроводящих соленоидов. С помощью постоянных магнитов однородное поле создается в зазоре между их полюсами. Они не требуют энергии, но не дают возможности эффективно и просто управлять величиной магнитного поля. Величина получаемой магнитной индукции для них определяется остаточной намагниченностью материала магнита и размером зазора между полюсами. Для разных материалов величина поля может иметь различные значения до величин порядка 1 Тесла. Помимо железа в эту группу входят никель, кобальт, ниодим, гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, туллий и ряд сплавов. Постоянные магниты широко применяются в ядерно-магнитных и электронно-парамагнитных спектрометрах, где требуется стабильное однородное поле определенной величины.

В лабораторной практике, где энергозатраты не являются главным критерием, а важно удобство управления, однородное поле чаще всего создается с помощью катушек и соленоидов. Для получения относительно слабых полей вплоть до 0.1 Тл чаще всего используются катушки с током. При этом поле высокой степени однородности можно получить, используя соленоид или катушки Гельмгольца. При указанных величинах поля необходимые токи сравнительно невелики и легко обеспечиваются лабораторными средствами. Поля средней величины порядка 0.1-1 Тл получить предыдущим способом труднее, поскольку требуемые при этом токи пропорционально возрастают, а рассеиваемая тепловая мощность и мощность источников питания растет как квадрат тока, что и порождает ряд технических проблем. Для получения таких полей в лабораторной практике широко используются электромагниты, т.е. катушки с током на ферромагнитном сердечнике, чаще всего из железа. Здесь также как и с постоянными магнитами в зазоре между полюсами создается однородное магнитное поле. Магнитная проницаемость железа может достигать величины нескольких тысяч (у чистого железа до 20000). Таким образом, сравнительно малым током можно вызвать большую намагниченность сердечника и получить в зазоре электромагнита магнитное поле с величиной индукции на несколько порядков большей, чем она была бы

в такой же катушке без сердечника. Физическим ограничением для получения сильных полей данным методом является величина магнитной индукции насыщения магнетика, достигая которую, магнетик перестает вносить дальнейший вклад в величину магнитного поля (для железа индукция насыщения равна 2.18 Тл). Поэтому для получения сильных полей используются только катушки с током без сердечника. Проблемы мощности решаются либо применением кратковременного, импульсного режима работы, либо использованием сверхпроводящих соленоидов. Подобно постоянным магнитам, сверхпроводящие магниты после возбуждения поля теоретически не требуют энергии, работая в короткозамкнутом режиме с применением теплового ключа. Однако значительная мощность должна тратиться на охлаждение обмоток, поскольку известные в настоящее время сверхпроводящие материалы обладают сверхпроводимостью только при низких, криогенных температурах, при которых в качестве хладагента используется жидкий гелий, с температурой кипения 4,2 К. С помощью сверхпроводящих соленоидов можно создавать поля более 10 Тл. Особенностью сверхпроводящих соленоидов является формирование рабочей области внутри соленоида, где обеспечивается высокая однородность поля до  $10^{-4}$ . Например, в лабораториях Объединенного Института Ядерных Исследований (ОИЯИ) в Дубне создаются однородные магнитные поля до 26 Тесла с однородностью  $10^{-4}$  в цилиндрическом объеме диаметром 300 мм. В настоящее время однородные магнитные поля с однородностью  $10^{-6} - 10^{-7}$  создаются с помощью сверхпроводящих полых цилиндров, устанавливаемых внутри сверхпроводящего соленоида. Такой цилиндр выполняет роль одного короткозамкнутого сверхпроводящего витка. Сверхвысокая однородность поля создается благодаря геометрически точному выполнению цилиндрических поверхностей и высокой чистоты обработки этих поверхностей, до зеркального блеска.

Наконец отметим, что сверхпроводящие магниты Большого адронного коллайдера, охлаждаемые жидким гелием до температуры 1,9 К, позволяют создавать индукцию магнитного поля на трассе разгона частиц до 8.5 Тл. (Участок трассы показан на обложке описания).

## Экранирование магнитных полей.

Во многих областях науки и техники для измерения или электронного преобразования очень малых по величине физических величин необходима их защита от внешних электромагнитных полей. Все электромагнитные экраны “работают” на поглощение и отражение электромагнитных волн. В случае магнитных полей низкой частоты (от единиц до сотен Герц) основным механизмом экранирования являются потери на поглощение.

Постоянные магнитные поля только поглощаются. В связи с этим для создания магнитных экранов целесообразно применять ферромагнитные материалы с высокой магнитной проницаемостью. Некоторые из ферромагнетиков были перечислены выше. Наибольшее распространение нашли железоникелевые сплавы под названием пермоллой, который обладает магнитной проницаемостью  $\mu = 10^4$ . Известен также аналогичный сплав, который за рубежом получил название мю – металл с магнитной проницаемостью  $\mu = 10^5$ . Такие материалы, обладая высокой магнитной проницаемостью, концентрируют в объеме материала внешнее магнитное поле, не пропуская его внутрь экранированной области. Однако эти материалы обладают низким значением напряженности поля, при котором они входят в насыщение, т.е. перестают концентрировать в себе внешнее магнитное поле. В таких случаях экраны делают многослойными. Наружный слой изготавливают с низким  $\mu$  и высоким значением напряженности насыщения магнитного поля (мягкая сталь). Внутренний слой – наоборот с высоким  $\mu$  и низкой напряженностью насыщения магнитного поля (пермоллой, мю – металл). Величина, которая характеризует ослабление внешних полей по сравнению с полями внутри экранированной области называется коэффициентом экранирования и определяется следующим отношением:

$$K = B_{\text{ex}} / B_{\text{in}} \quad \text{где} \quad (1)$$

$B_{\text{ex}}$  и  $B_{\text{in}}$  - соответственно индукция внешнего и внутреннего магнитного поля.

Следует отметить, что удары, а также механическая обработка таких материалов как пермоллой и мю – металл приводят к ухудшению их магнитных свойств. Это связано с нарушением доменной структуры этих материалов. Чтобы восстановить магнитные свойства материалов их необходимо нагреть и медленно охладить. (Такая термическая обработка называется отжигом.)

### Соленоид

Соленоид представляет собой цилиндрическую катушку с обмоткой. Индукция магнитного поля на оси соленоида определяется следующим уравнением:

$$B = 0,5 \mu_0 n I (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \quad \text{где} \quad (2)$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  - магнитная постоянная,

$n$  - число витков на один метр соленоида,

$I$  - сила тока через обмотку,

$\alpha_1, \alpha_2$  - углы, под которым видны концы соленоида из точки измерения, рис.1

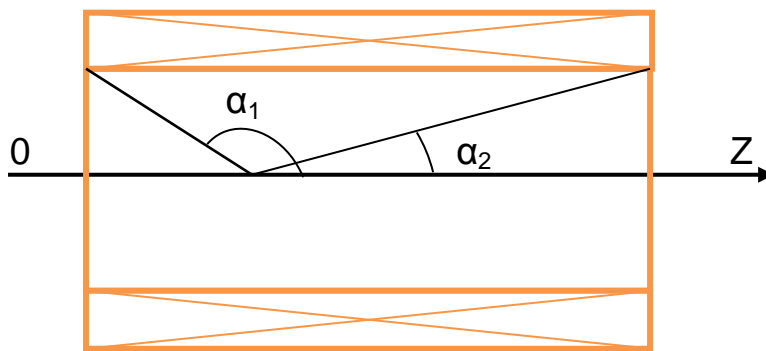


Рис. 1.

В центре длинного соленоида с большим отношением длины к диаметру  $L/D > 10$  величина индукции магнитного поля приближается к предельному значению:

$$B = \mu_0 n I$$

и характеризуется высокой степенью однородности, как в продольном, так и в радиальном направлении. Соленоиды позволяют получать поля приблизительно 0,2 Тл, а при специальном охлаждении и больше. К недостаткам соленоида можно отнести то, что исследуемый объект должен задвигаться с торца далеко в его центр, где доступ к нему ограничен.

Уравнение (2) можно представить в следующем виде:

$$B = K \mu_0 I, \text{ где} \quad (3)$$
$$K = 0,5 n (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)$$

Зная размеры соленоида, т.е. его длину и внутренний диаметр, а также измерив индукцию магнитного поля внутри соленоида при известном токе соленоида, можно определить магнитную постоянную  $\mu_0$ .

В данной работе применяется два соленоида большой 1 и малый 2, рис. 3. У большого по размерам соленоида 1 внутренний диаметр равен 70 мм, длина обмотки 126 мм. Число витков равно У малого соленоида 2 внутренний диаметр равен 58 мм, длина намотки равна 51 мм, число витков составляет

## Датчик Холла

Для измерения индукции магнитного поля широкое применение находят датчики на основе эффекта Холла. Для понимания эффекта Холла рассмотрим проводник в форме призмы, шириной  $b$  и толщиной  $d$ , рис. 2. Пусть электрический ток  $I$  (движение положительных зарядов) направлен вдоль оси  $Y$ , от контакта 1 к контакту 2. При этом верхняя грань  $C$  и нижняя грань  $D$ , соответственно вверху и внизу призмы, симметричны по отношению к току и находятся на одной эквипотенциальной поверхности.

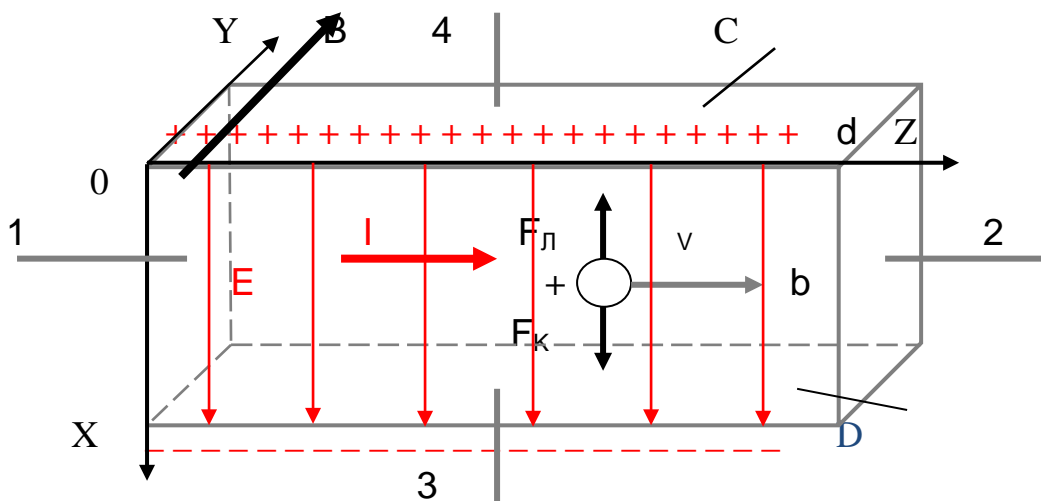


Рис. 2.

Поэтому разность потенциалов между ними равна нулю. При включении магнитного поля  $B$ , вектор индукции которого направлен вдоль оси  $Y$ , траектория движения зарядов изменится, т.е. заряды отклонятся в сторону верхней грани призмы под действием силы Лоренца:

$$F_L = q v B, \quad \text{где}$$

$q$  - электрический заряд,

$v$  - скорость движения заряженных частиц,

$B$  - индукция внешнего магнитного поля

В результате на нижней грани проводника сконцентрируются отрицательные заряды. а на противоположной, симметрично расположенной стороне сконцентрируются положительные заряды. Между этими зарядами, как между обкладками пластин плоского конденсатора, возникнет электрическое поле, которое принято называть электрическим полем Холла, которое, в свою очередь, воздействует на заряд  $q$  с силой Кулона:

$$F_k = q E_x$$

Сила Кулона направлена противоположно силе Лоренца. Заряды на верхней и нижней гранях будут накапливаться до тех пор, пока электрическое поле Холла не уравновесит действие силы Лоренца. Тогда

$$\begin{aligned} q E_x &= q v B \\ \text{откуда} \quad E_x &= v B \end{aligned}$$

Введем выражение для эдс Холла, возникающей между гранями призмы  $C$  и  $D$ , контакты 3 и 4, находящимися на расстоянии  $b$ , рис. 2.

$$\mathcal{E}_x = U_x = E_x b = v b B \quad (4)$$

Для преобразования формулы (4) в рабочую формулу, т.е. формулу, содержащую физические величины, доступные для лабораторных измерений, заменим скорость движения носителей заряда  $v$  на величину силы тока  $I$ .

Пусть число носителей тока в единице объема образца (концентрация носителей тока) равно  $n$ . Тогда плотность тока, протекающего через единицу поверхности образца (поверхности параллельной плоскости  $ХОУ$ , т.е. торцу призмы), равна:

$$\begin{aligned} j &= q n v \\ \text{а сила тока} \quad I &= j b d = q n v b d \\ \text{откуда} \quad v &= I / q n b d \end{aligned}$$

Учитывая это соотношение, получим:

$$\mathcal{E}_x = I B / q n d$$

Экспериментальное определение эдс Холла проводят на образце с заданной толщиной  $d$ , при фиксированном значении силы тока  $I$ . При этом полученное значение эдс Холла рассчитывают на единицу толщины образца и единицу силы тока, которую называют удельной или приведенной эдс Холла, т.е.

$$\begin{aligned} \varepsilon_x^* &= \varepsilon_x d / I \\ \text{тогда} \quad \varepsilon_x^* &= R B \end{aligned} \quad (5)$$

где коэффициент пропорциональности  $R = 1 / q n$  является характеристикой вещества датчика Холла и называется коэффициентом Холла или постоянной Холла. Размерность константы  $[m^3 / K]$ . В зависимости от знака заряда постоянная Холла может принимать положительные и отрицательные значения. Принято относить вещества с электронной проводимостью к проявлению нормального эффекта Холла или классического эффекта Холла. Значение константы Холла в этом случае отрицательно. К таким веществам относятся, например, элементы первой группы таблицы Менделеева. Соответственно вещества с дырочной проводимостью (положительные заряды) проявляют аномальный эффект Холла. Константа Холла в этом случае положительна. Константа, кроме того, зависит от заполнения зоны проводимости вещества, примесей и дефектов кристаллической решетки вещества.

Таким образом, прямая зависимость эдс Холла от величины индукции магнитного поля позволяет применять эффект Холла для измерения индукции магнитного поля. В качестве датчиков Холла обычно применяют легированные полупроводники с преобладанием заряда одного знака. Преимуществами датчиков Холла являются их малые размеры ( $1 \text{ мм}^2$  и менее) и очень малая инерционность, что позволяет применять их на частотах до  $10^{10} \text{ Гц}$ .

Как правило, перед проведением измерений датчик Холла калибруют по эталонному значению магнитного поля. В данной работе применяются датчики Холла совместно с микропроцессорным измерительным прибором LabQuest, которые не требуют калибровки.

## Описание экспериментальной установки.

Комплект оборудования, необходимый для проведения экспериментов показан на рис. 3. В комплект входит большой соленоид 1 и малый соленоид 2, источник тока 3 и универсальный измерительный прибор LabQuest 4 с датчиком Холла 5. Для экранирования магнитного поля предназначена ферромагнитная трубка из стали 6.





Рис. 3.

### Задание № 1.

Определить магнитную постоянную  $\mu_0$ .

#### Последовательность выполнения эксперимента.

1. Подключить катушку 1, рис. 3 к источнику тока 3. Выход источника, (клеммы + и -) необходимо подключать к крайним контактам соленоида 1.
2. Включить универсальный измерительный прибор LabQuest 4. Кнопка включения находится в левом верхнем углу прибора. При включении прибора начинает светиться ободок кнопки. К аналоговому входу прибора, который расположен в торце верхней части прибора, подключить датчик Холла 5. На экране прибора появится сектор с индикацией индукции магнитного поля в единицах миллитесла (mT).

3. В соответствии с таблицей 1 регулятором тока на источнике тока 3 установить токи в соленоиде и измерить индукцию магнитного поля в центре соленоида датчиком Холла 5. При измерениях поля необходимо следить, чтобы конец штанги с датчиком Холла находился в центре соленоидов. При этом необходимо штангу располагать на оси соленоидов. Измеренные значения индукции магнитного поля, соответствующие установленным токам, записать в таблицу 1.

Таблица 1.

I, A	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
B, T									

4. С помощью программы Logger Pro 3 построить графики  $B = f(I)$ . Используя уравнения (1) и (2) по угловому коэффициенту и параметрам катушки определить магнитную постоянную  $\mu_0$ .

## Задание № 2.

Исследовать суперпозицию магнитных полей двух соленоидов 1 и 2 с током.

### Последовательность выполнения эксперимента.

1. Соединить два соленоида в последовательную цепь и подключить к источнику тока 3.
2. Установить ток в соленоидах равный 1 А.
3. Измерить индукцию магнитного поля в центре каждого соленоида. Измеренные значения индукции внести в таблицу 2.

Таблица 2.

	Поля соленоидов <b>складываются</b>	Поля соленоидов <b>вычитаются</b>	Поле <b>1-го</b> соленоида	Поле <b>2-го</b> соленоида
I, A	1	1	1	1
B, T				

4. Соленоид 2 вставить внутрь соленоида 1, измерить индукцию магнитного поля в центре совмещенных соленоидов датчиком Холла 5. Результаты измерений записать в таблицу 2.

5. Соленоид 1 снять с соленоида 2 и повернуть его на  $180^\circ$ , т.е. поменять местами полюса соленоида 1. Снова соленоид 2 вставить внутрь соленоида 1 и измерить индукцию магнитного поля в центре соленоидов. Результат измерений записать в таблицу 2.
6. Проанализировать и объяснить состояние измеренных магнитных полей соленоидов в обоих случаях.

### Задание № 3.

Исследовать эффект экранирования магнитного поля ферромагнитным экраном. В качестве ферромагнитного экрана необходимо использовать стальную трубку.

#### Последовательность выполнения эксперимента.

1. Подключить соленоид 1 к источнику тока 3. Установить ток в соленоиде равный 1 А.
2. Вставить трубку 6 внутрь соленоида 1, так чтобы концы трубки располагались на одинаковом расстоянии от соответствующих концов соленоида. При этом несоосность соленоида и трубки не имеет значения.
3. Измерить индукцию магнитного поля в центре соленоида внутри трубки. Измеренное значение индукции записать в протокол лабораторной работы. Вычислить коэффициент экранирования трубки из отношения (1). Объяснить полученный результат.

#### Контрольные вопросы.

1. При каких условиях проявляется электромагнитная индукция ?
2. Какие законы лежат в основе формирования магнитного поля соленоида ?
3. В чем состоит принцип суперпозиции полей ?
4. Какие явления лежат в основе работы датчика Холла ?
5. Каким из материалов диамагнитным, парамагнитным или ферромагнитным можно экранировать магнитные поля. Почему?
6. Чем отличается экранирование магнитных полей от экранирования электрических полей.

## Литература.

1. Калашников С.Г. Электричество, М. Физматлит, 2003.
2. Мякишев Г.Я. Электродинамика, М. Дрофа, 2006.
3. Программа построения графиков Logger Pro 3.