

Комплексное исследование магнитного поля и Холловский эффект

Ж.Даваажав, С.Мягмарсурэн, В.Цэзэн

Ховдский филиал Монгольского Государственного
Университета, Ховд, Монголия

Целью данной работы является разработка общей методики экспериментального установления основных характеристик и параметров магнитного поля таких, как энергия, индукция. Экспериментально-расчетный результат полученной методики допускает проверку по наблюдению Холловского эффекта. Поскольку, в сфере данного исследования решены некоторые проблемы, вытекающие из логической их связи, в целом, можно сказать, что комплексным.

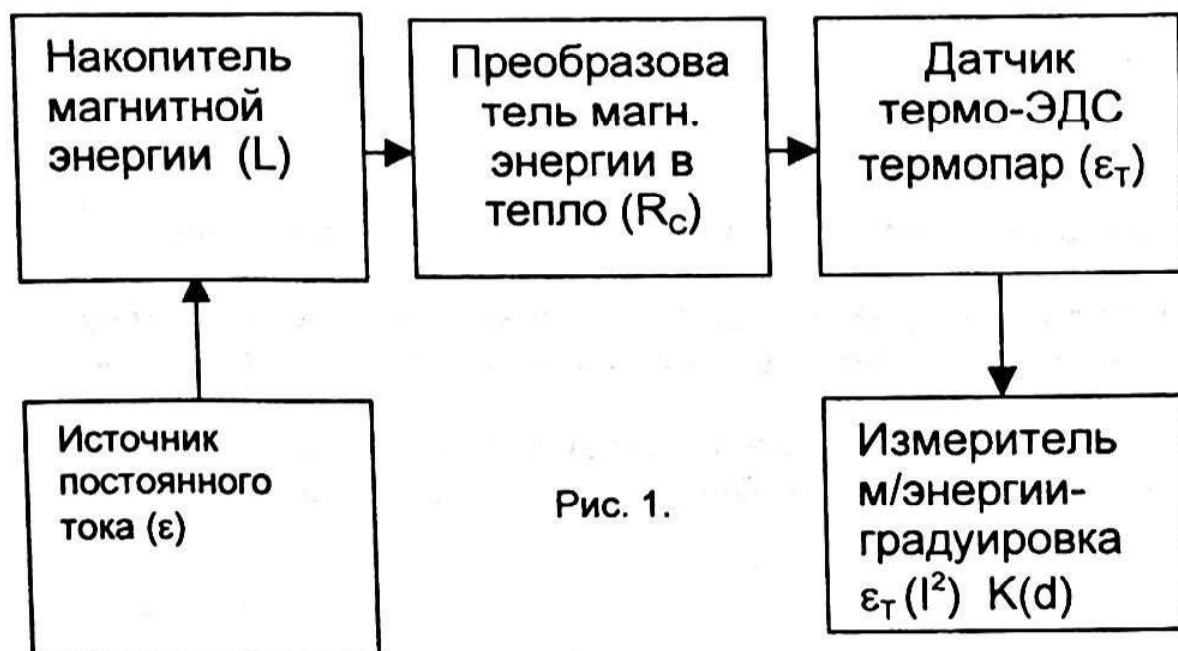


Рис. 1.

Согласно блочной схеме на рис. 1. энергию магнитного поля катушки с индуктивностью L и током I можно определить путем использования взаимного преобразования энергии, как электрической-магнитной-тепловой-электрической.

Для определения энергии магнитного поля индукционной катушки собирают установку, электрическая схема которой показана на рис. 2. В качестве индукционной катушки мы использовали электромагнит, состоящий из дроссельной катушки и сердечника с двумя полюсными наконечниками, повернутыми плоскими сторонами друг к другу. При замыкании ключа K (положение 1) ток I проходит по катушке с индуктивностью L . За счет чего в катушке образуется ЭДС самоиндукции, которая согласно правилу Кирхгофа:

$$I = (\varepsilon + \varepsilon_1) / R \quad \varepsilon = I \cdot R - \varepsilon_1 = I \cdot R - (-L \cdot \frac{dI}{dt}) = I \cdot R + L \cdot \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

Здесь, R будет суммой сопротивления реостата и омического сопротивления катушки L . За времени dt источник электрической энергии совершает работу:

$$\varepsilon \cdot I \cdot dt = I^2 \cdot R \cdot dt + L \cdot I \cdot dI \quad (2)$$

Первое слагаемое в формуле (2) дает работу Джоуля-Ленца над сопротивлением R , а второе выражает дополнительную работу, обусловленную явлением самоиндукции. Следовательно, та дополнительная работа, расходуемая за увеличением тока в цепи от 0 до значения I является энергией магнитного поля [1].

$$W = \int_0^I L \cdot I \cdot dI = \frac{L \cdot I^2}{2} \quad (3)$$

А теперь при замыкании ключа (положение 2) во второй цепи ток самоиндукции I_1 проходит через

омическое сопротивление катушки R_k и резистор R_c , на которых и соответственно выделяются теплоты Q_k и Q_c . То есть, энергия, запасенная в магнитном поле катушки, переходит в электрическую, а затем в тепловую, преобразуясь в тепло в сопротивлениях. Согласно закону сохранения энергии, после некоторых преобразований соотношение энергий следует [6], что

$$\frac{W}{Q_c} = \frac{R_k + R_c}{R_c} \quad (4)$$

В этом выражении сопротивления R_k и R_c есть известные и точно измеряемые параметры. Поэтому для определения W нам придется узнавать величину Q_c и возникает новая проблема.

Количество выделяющейся теплоты Q_c на сопротивление R_c :

Для определения этой неизвестной величины Q_c используем уравнение теплового баланса вещества [2], так как количество теплоты Q_c пропорционально к изменению температуры ΔT материала с сопротивлением R_c , и поэтому

$$Q_c = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (5)$$

где m -масса материала имеющегося сопротивление R_c , в килограммах, c -удельная теплоемкость того же материала, в Джоулях на Кельвин.

Изменение температуры ΔT измеряют термопаром ТП и для этого измерительный контакт прибора прикрепляется внутри витков сопротивления R_c , а другой сравнивающий контакт поместится отдельно в комнатной температуре T_0 (рис. 2.). Температурная разность контактов термопара ΔT прямо пропорциональна к межконтактной потенциальной разности-термо ЭДС ε_T . С учетом этого получим,

$$Q_c = m \cdot c \cdot \frac{\varepsilon_T}{S} \quad (6)$$

где S -чувствительность термопара, милливольт на Кельвин.

Если выбирают таким, сопротивление R_c значительно больше, чем сопротивление катушки R_k как $R_c > R_k$, то эффект преобразования энергии магнитного поля хорошо прослеживается. Поэтому в качестве R_c используют проволоочный спираль, сделанный из сплава с большим удельным сопротивлением. В подавляющем большинстве для такого металлического сплава удельная теплоемкость неизвестна и в справочных литературах не вписывается. Так что нам придется определить эту величину. Для этого мы придумали маленькую хитрость.

Определение удельной теплоемкости сплава:

Собирают электрическую схему по рис. 3. Проводник, по которому течет ток I' в течении t , нагревается и в нем выделяется некоторое количество тепла. Если при этом не возникает никаких других форм энергии, то по закону сохранения энергии

$$I'^2 \cdot R_c \cdot t = m \cdot c \cdot \Delta T' \quad (7)$$

Используя тот же термопар, можно определить $\Delta T' = \frac{\varepsilon'_T}{S}$.

Поэтому

$$\frac{m \cdot c}{R_c \cdot S} = I'^2 \cdot \frac{t}{\varepsilon'_T} = \text{const} \quad (8)$$

В этом выражении ε'_T пропорционален к времени t . Величины I', ε'_T, t экспериментально измеряются. Ко вниманию, время t должно считаться с момента включения ключа K по окончанию измерения. Таким образом, за вторую половину опыта, можно определить

удельную теплоемкость для любых электропроводящих материалов.

Энергия магнитного поля:

Подставляя выражения (6) и (8) в (4), получим, что

$$W(l, d) = \frac{L \cdot I^2}{2} = A \cdot \epsilon_T(l, d) \quad (9)$$

где A-постоянная прибора, которая будет

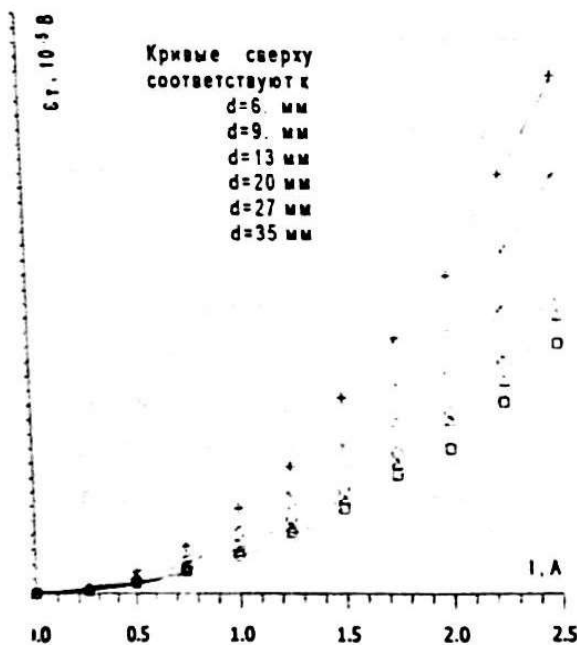


Рис. 4. Зависимость термо-ЭДС от силы тока $\epsilon_T(I)$ при разных значениях межполюсового расстояния d

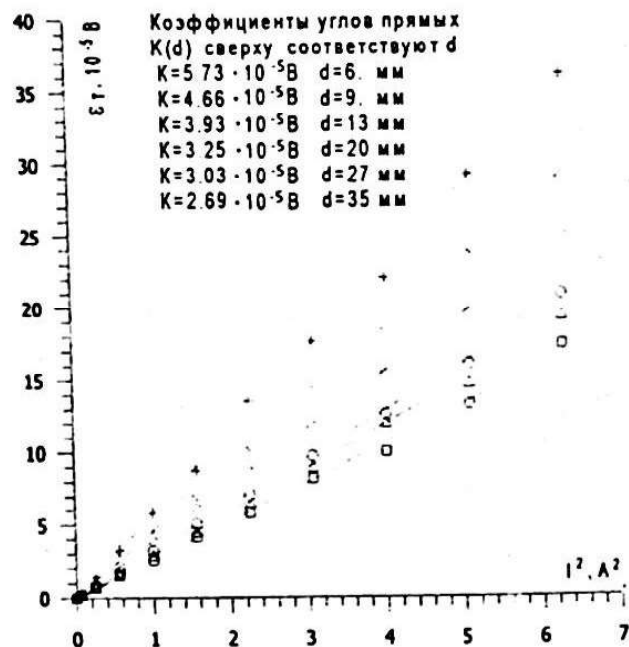


Рис. 5. Зависимость термо-ЭДС от квадрата силы тока $\epsilon_T(I^2)$ при разных значениях межполюсового расстояния d

$$A = 10^3 \cdot (R_K + R_C) \cdot \frac{m \cdot c}{R_C \cdot S} = 10^3 \cdot (R_K + R_C) \cdot I'^2 \cdot \frac{t}{\epsilon'_T} \quad (10)$$

На самом деле, энергия магнитного поля $W(l, d)$ является функцией двух переменных, т.е., во первых, зависит от силы тока I , во вторых, от расстояния между полюсами электромагнита d .

Для определения энергии магнитного поля в зазоре электромагнита нами экспериментально построен график зависимости термо-ЭДС от силы тока $\varepsilon_T(I)$ при разных значениях d (Рис. 4.). От этого вытекает, что зависимость $\varepsilon_T(I)$ является квадратичной, а $\varepsilon_T(I^2)$ – прямолинейной (Рис. 5.). Таким образом, для данного прибора получаются вольт-ампероквадратные характеристики (ВА²Х) $\varepsilon_T(I, d) = K(d) \cdot I^2$ и их коэффициенты $K(d)$, являющиеся в своей очереди функцией d . Это приводит к следующему выражению, в котором W зависит от I по квадратичным законом. А зависимость от d еще не известна:

$$W(I, d) = A \cdot \varepsilon_T(I, d) = A \cdot K(d) \cdot I^2 \quad (11)$$

где коэффициент $A \cdot K(d)$ согласно формуле (3) будет выражать индуктивность электромагнита $L/2$.

Поэтому используя ВА²Х построим градуировочный график зависимости $K(d)$ (Рис. 6.).

Такая градуировка представляет собой как измеритель энергии магнитного поля, создавшегося в данном электромагните при любых значениях силы тока и расстояния между его полюсами. А выражение (11) является эмпирической формулой (основанной на опыте) для определения магнитной энергии данного электромагнита.

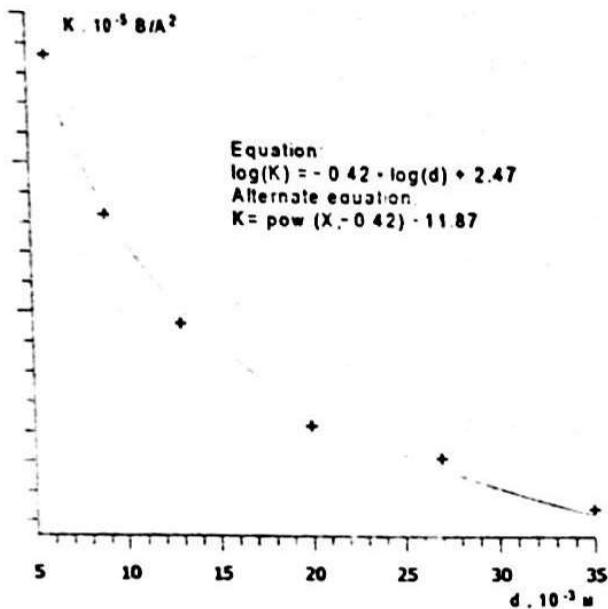


Рис. 6 Градуировочный график зависимости $K(d)$

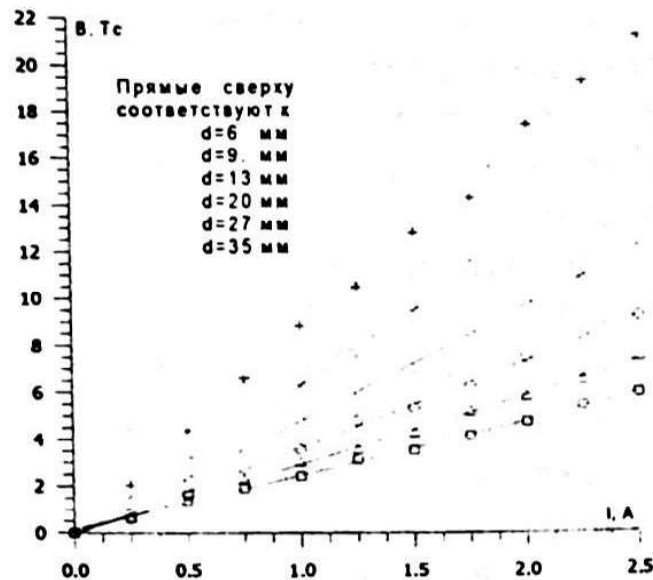


Рис. 7. Зависимости магнитной индукции от силы тока $B(I)$ при разных значениях межполюсового расстояния d

К определению магнитной индукции поля:

Разделив выражение (11) на объем воздушного зазора между полюсами электромагнита, получим объемную плотность магнитной энергии. Это справедливо лишь в тех приближениях, что магнитное поле почти полностью сосредоточено в зазоре между плоскими полюсами электромагнита.

$$\omega(l, d) = \frac{A \cdot K(d)}{S \cdot d} \cdot I^2 \quad (12)$$

где S - площадь поперечного сечения полюса электромагнита. Это значит, что магнитная энергия локализована в зазоре между полюсами электромагнита с объемной плотностью $\omega(l, d)$.

С другой стороны, объемная плотность магнитного поля прямо пропорциональна квадрату магнитной индукции B в данном месте пространства [1, 3].

$$\omega(l, d) = \frac{B^2}{2 \cdot \mu \cdot \mu_0} \quad (13)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость, μ_0 – магнитная постоянная. Из сопоставления выражений (12) и (13) следует, что магнитная индукция и сила тока связаны соотношением:

$$B(l, d) = \sqrt{\frac{2 \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot A \cdot K(d)}{S \cdot d}} \cdot l \quad (14)$$

Поскольку для данного электромагнита градуировка $K(d)$ уже установлена нами, согласно формуле (14) можно графически построить семейство зависимости $B(l, d)$. Из этих графиков (рис. 7.) магнитная индукция непосредственно определяется без измерения и также без вычисления при разных значениях либо d , либо l .

Таким образом, мы получили эмпирическую формулу (14) и создали градуировочные кривые для определения магнитной индукции как готовый измерительный прибор.

Изготовление Холловского образца и наблюдение эффекта Холла:

Одним из самых интересных явлений в физике является классический эффект Холла, объясняющийся на основе квантовой теории.

При помещении проводника с током I_x в магнитное поле B внутри проводника возникает электрическое поле, направленное перпендикулярно направлению тока и магнитному полю (рис. 8). Этот замечательный эффект был обнаружен и исследован американским физиком Эдвином Холлом в 1879 году и теперь носит его имя [5].

Разность потенциалов (ее называют холловской разностью потенциалов или холловской ЭДС Π_x),

$$\epsilon_x = \frac{I_x \cdot B}{e \cdot n \cdot a} = \frac{R}{a} \cdot I_x \cdot B \quad (15)$$

где a -толщина проводника в направлении магнитного поля B , $R=1/en$ -постоянная Холла, n - концентрация свободных носителей зарядов, e -электронный заряд

Для эксперимента мы предлагаем использовать в качестве образца лезвие безопасной бритвы типа "Спутник" [7], также медную фольгу с толщиной 0.04 мм из фольгированного гетинакса. Для изготовления преобразователя отжигают лезвие в пламени газовой или спиртовой горелки и вырезают полосу, форма и размеры которой показаны на рис. 9. Припаивают к ней контакты-токовые 1, 2 и потенциальные 3, 4. Готовый датчик для изоляции и надежности мест байки помещают между двумя листами клейкой полиэтиленовой пленки 5.

Экспериментально устанавливаются оптимальные

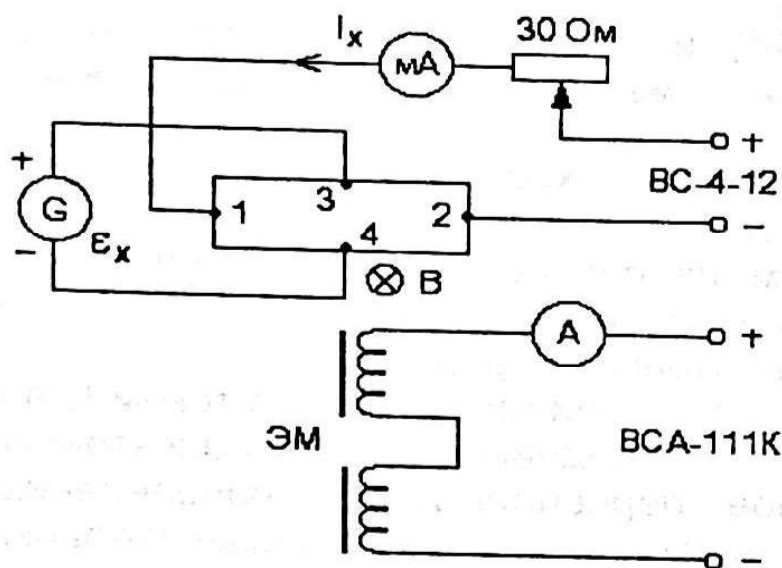


Рис. 10. Электрическая схема по наблюдению эффекта Холла

геометрические размеры образца, поскольку

наблюдаемый эффект Холла значительно зависит от отношения длины и ширины образца кроме его материального свойства.

Для наблюдения эффекта Холла собирают

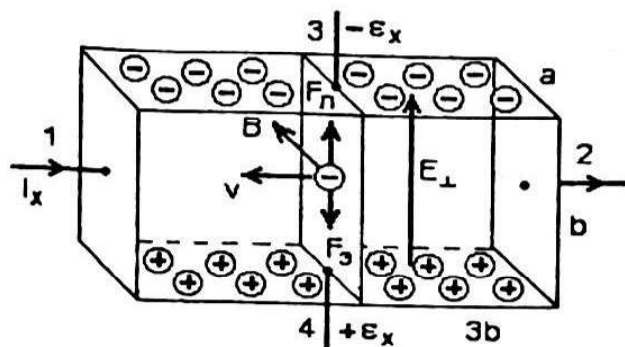


Рис. 8. Механизм возникновения Холловской ЭДС

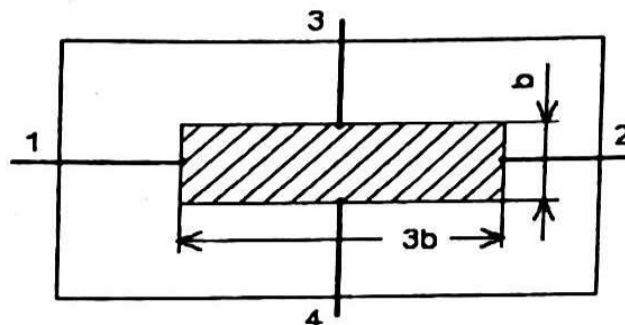


Рис. 9. Холловский датчик (1 и 2-токовые, 3 и 4-потенциальные контакты)

установку, электрическая схема которой состоит из двух индукционно связанных схем, а не гальванически (рис. 10.). Силу тока I_x , источником которого служит выпрямитель ВС-4-12, измеряют лабораторным миллиамперметром (мА). Магнитное поле создается электромагнитом (ЭМ), составленным из дроссельной катушки и сердечника с двумя полюсными наконечниками, повернутыми плоскими сторонами друг к другу. Преобразователь помещают в зазор между полюсными наконечниками. Индикатором ЭДС Холла служит гальванометр типа М-1032 со световым указателем (G).

В результате проведения эксперимента нами утверждено, что холловский потенциал прямо пропорционален силе тока, проходящегося через образец Холла и установлены холловские параметры для некоторых веществ.

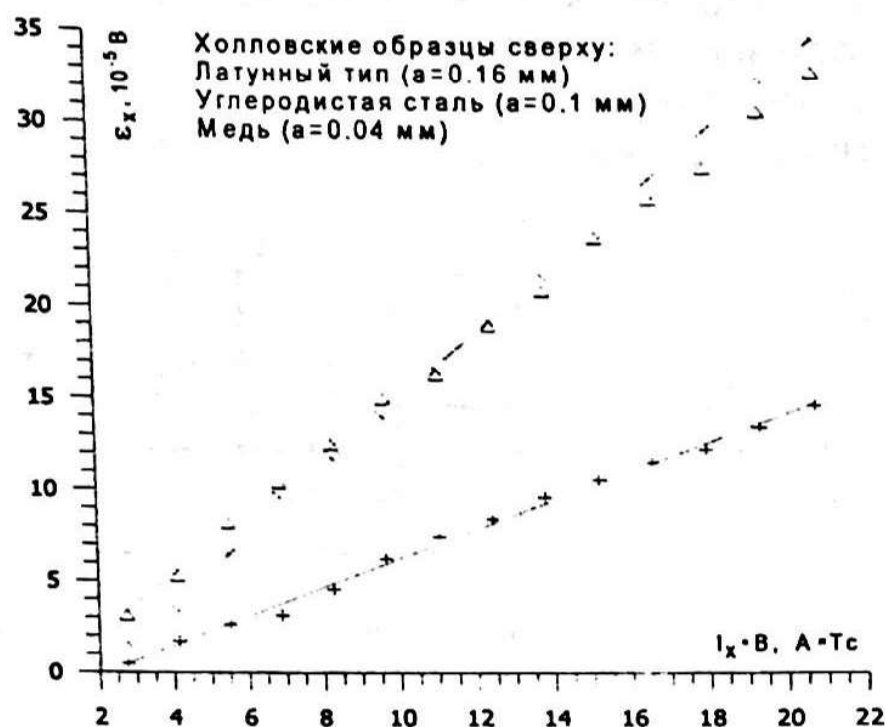


Рис. 11. Зависимость Холловской ЭДС от произведения тока протекающего через холловский датчик и магнитной индукции $E_H(I_x \cdot B)$ при $B=13.8$ Тс

Для данного проводника небольшого размера (его называют датчиком Холла) построят график зависимости ЭДС Холла E_H от произведения $I_x B$ (Рис. 11.). И графическим методом определяют холловский коэффициент R пропорциональности между E_H и произведением $I_x B$, так же можно вычислить важную характеристику, как концентрация свободных носителей зарядов n в веществе. Экспериментально-расчетные параметры приведены в таблице. Эти результаты удовлетворительно согласуются с табличными данными [4], что свидетельствует о надежности метода.

Холловские образцы	Магнит	Толщина	Постоянная Холла R , $\text{м}^3/\text{Кл}$		Концентрация носителей заряда n , м^{-3}	
			Экспериментальное значение	Табличное значение	Экспериментальное значение	Табличное значение
Латунный тип	13.8	1.6	$29.7 \cdot 10^{10}$	-	$0.24 \cdot 10^{28}$	-
Углеродистая сталь		1.0	$16.3 \cdot 10^{10}$	$13.4 \cdot 10^{10}$	$0.38 \cdot 10^{28}$	$0.5 \cdot 10^{28}$
Медь		0.4	$31.8 \cdot 10^{11}$	$20.2 \cdot 10^{11}$	$0.2 \cdot 10^{29}$	$0.31 \cdot 10^{29}$

Таким образом, нами изготовлены холловские образцы за использованием обычного материала под рукой и разработаны методики по наблюдению и постановлению эффекта Холла в наших лабораторных условиях.

В данной работе, в целом, нами придуман и разработан наиболее оптимальный, изящный метод экспериментального определения основных характеристик и параметров магнитного поля таких, как энергия, индукция. Несмотря на логичность, четкость, гармонию полученной методики, наш вывод не является совершенным и правдивым.

Литература:

1. Д.В.Сивухин. Общий курс физики. Том III. Электричество часть первая. Наука, Москва, 1996.
2. С.Мягмарсүрэн, Ж.Даваажав. Один способ измерения магнитной энергии. Ученые записки. Ховдский филиал Мон.ГУ, 2000 г. №9
3. Physics teachers' guide 2, Units H to L, Revised Nuffield Advanced Science, Hong Kong, 1988.
4. J.S.Blakemore. Solid state physics (second edition) Cambridge University Press. 1985
5. Научно-популярный физико-математический журнал. Квант, 1989. №3
6. Научно-популярный физико-математический журнал. Квант, 1998. №1
7. Научно-методический журнал. "Физика в школе" 1998. №1.

Abstract:

To complex research for magnetic field and Observation of the Hall effect

S.Myagmarsuren, J.Davaajav, U.Tsezen (The Hovd branch of The Mongolian State University)

In this work the most optimum and graceful method to measure of magnetic field characteristics and main parametrs, as energy and induction is worked out. The magnetic field energy has been determined by the heat, which is in agreement with the expended work for creation of magnetic field. The thermoelectromotive force is measured for using the thermocouple.

As a result of the research some empirical equations and calibration graphs to determine of magnetic field energy and induction for given induction-coil without measure and measurements is obtained out. We have check-up the new method by Observetion of the Hall effect.